

Institut für Kulturpflanzenwissenschaften
Universität Hohenheim
Fachgruppe: Düngung und Bodenstoffhaushalt
Prof. Dr. Torsten Müller

**Rahmenbedingungen für eine vereinfachte
„gabenreduzierte“ N-Düngung zu Winterweizen
(*Triticum aestivum* L.)**

**Einfluss des Standorts, des N-Nachlieferungspotentials
sowie der Sorten und der Witterung auf das Erreichen
von Ertrags- und Qualitätszielen**

Dissertation
zur Erlangung des Grades
„Doktor der Agrarwissenschaften“
(Dr. sc. agr.)
vorgelegt der Fakultät Agrarwissenschaften
von

Thomas Makary
geboren in Lebach

2018

Dekan:	Prof. Dr. Ralf. T. Vögele
Berichter:	Prof. Dr. Torsten Müller
Mitberichter:	Prof. Dr. Carola Pekrun

Die vorliegende Arbeit wurde am 28.11.2017 von der Fakultät Agrarwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Agrarwissenschaften“ angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2017

1. Prüfer:	Prof. Dr. Torsten Müller
2. Prüfer:	Prof. Dr. Carola Pekrun (Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen)
3. Prüfer:	Prof. Dr. Roland Gerhards
Prüfungsvorsitz:	Prof. Dr. Thilo Streck

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Die Bedeutung des Weizenanbaus.....	7
1.2	Die Standortansprüche sowie der Nährstoffbedarf von Weizen.....	7
1.3	Die Ertragsbildung von Weizen	10
1.4	Die Sorteneigenschaften und Qualität von Weizen	11
1.5	Die N-Düngung von Weizen in der Praxis.....	12
1.6	Die Notwendigkeit sowie Alternativen einer geteilten N-Düngung	13
1.7	Ziele der Arbeit	16
2	Publikationen (Kapitel 1, 2, 3).....	17
2.1	Kapitel 1: Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany.	18
2.2	Kapitel 2: Simplified N fertilization strategies to winter wheat. Part 1: Plants: Compensation capacity of modern wheat varieties	48
2.3	Kapitel 3: Simplified N fertilization strategies to winter wheat. Part 2, Soils: N-mineralization potential affected by long-term cattle manure application	74
3	Allgemeine Diskussion	99
3.1	Einfluss der Sorteneigenschaften.....	99
3.2	Einfluss der Standorteigenschaften und des N- Nachlieferungspotentials	101
3.3	Einfluss der Witterung.....	103
3.4	Grenzen und Risiken gabenreduzierten N-Düngeverfahren.....	105
4	Zusammenfassung	106
5	Summary	109
6	Literaturverzeichnis	111

Publikationsliste

Liste aller Beiträge zu Tagungen und Fachzeitschriften

Danksagung

Lebenslauf

Eidesstattliche Versicherung und Belehrung

Verzeichnis über Abkürzungen und Akronyme sowie Begriffsklärungen

Abkürzungen und Akronyme

a.h.	after harvest
AHL	Ammonium-Nitrat-Harnstoff-Lösung
BP	Bodenpunkte
CAN	Calcium-Ammonium-Nitrat
°C	Grad Celsius
C/N	Kohlenstoff/Stickstoff Verhältnis
CaCl	Calciumchlorid
CAL	Calcium-Acetat-Lactat
CULTAN	Controlled-Uptake-Longterm-Ammonium-Nutrition
DM	Drymatter
e.g.	for example
g	Gramm
ha ⁻¹	pro Hektar
Harvest-Indices	Korn/Stroh Verhältnis
K	Kalium/Potassium
KAS	Kalkammonsalpeter
kg ⁻¹	pro Kilogramm
L.	Lineé
m	Meter
m ⁻²	Quadratmeter
mg	Milligramm
Mio.	Millionen
mm	Millimeter
N	Stickstoff/Nitrogen
n.t.	not tested
n.d.E	nach der Ernte
%Ndfs	Apparent N in grain derived from soil N mineralization
nFK	nutzbare Feld Kapazität
%NFR	Nitrogen Fertilizer Recovery in %

NH_4^+	Ammonium
NH_3	Ammoniak
$\text{N}_{i/o}$	Nitrogen input output ratio
N_{\min}	mineralisierter Stickstoff
NO_3^-	Nitrat
NUE	Stickstoff-Nutzungs-Effizienz
NYG	Nitrogen Yield Grain
%	Prozent
P	Phosphor
S	Schwefel
SE	Standardfehler
t	Tonnen
TKM	Tausend Korn Masse
TM	Trockenmasse
UREA	Harnstoff
UAN	Urea-Ammonium-Nitrate-Solution
VDLUFA	Verband deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten
v.s.	Vegetation start
w.n.f.	without nitrogen fertilization
z.B.	zum Beispiel

Begriffsklärung

Im Titel der vorliegenden Arbeit wird sowohl der Begriff „vereinfacht“ als auch der Begriff „gabenreduziert“ verwendet. Eine Vereinfachung der Düngung entspricht in dieser Arbeit einer Gabenreduktion und steht für ein Auslassen von geteilten N-Gaben mit Kalkammonsalpeter (KAS) sowie Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) und derer Zusammenfassung.

Weiter werden die Begriffe früh bzw. early und spät bzw. late verwendet. Diese bezeichnen jeweils den Applikationszeitpunkt der ersten N-Gabe. Early bedeutet, dass die erste N-Gabe zu BBCH 25/27 und late zu BBCH 29/31 appliziert wurde. In dieser Arbeit werden die Begriffe **BBCH** (Biologische **B**undesanstalt, **B**undessortenamt, **CH**emische Industrie) sowie Zadok Scale (ZS) verwendet. Diese Begriffe dienen beide der Bestimmung von morphologischen Wachstumsstadien von Pflanzen. Die Systeme basieren auf einem dezimalen Zahlensystem. Auch der Begriff On-farm-Research ist in dieser Arbeit häufig zu lesen. Dies betrifft insbesondere die erste Publikation (Kapitel 1). Dieser dient der Beschreibung des hier durchgeführten Versuchsansatzes. Es wurden großflächige Feldversuche unter Praxisbedingungen bei Landwirten unter einem partizipierenden Ansatz durchgeführt.

1 Einleitung

1.1 Die Bedeutung des Weizenanbaus

Der Weizen (*Triticum aestivum*) stellt eine der ältesten Kulturen, welche sich im Laufe von ca. 10.000 Jahren aus Wildgräsern entwickelt hat, dar. Die Genzentren der heute produktiven, mehltreichen Weizenformen werden in Nordindien, dem kaukasischen-anatolischen Raum, Ägypten und Äthiopien vermutet (HAUMANN und DIETSCH, 2000, S. 259-264). Die Weizenarten können in eine diploide, tetraploide und hexaploide Reihe eingeteilt werden (BRIGGLE und REITZ, 1963; KLAPP 1967; HOFFMANN et al. 1985). Weizen ist deutschlandweit wie auch weltweit fester Bestandteil landwirtschaftlicher Produktionssysteme, der nachgelagerten Wertschöpfungsketten sowie der menschlichen Ernährung.

Weizen findet als multifunktionaler Rohstoff sowohl Einsatz in der menschlichen und tierischen Ernährung als auch im industriellen Sektor, so einerseits der Energieproduktion, z.B. Bio-Ethanol, und andererseits zur Herstellung technischen Rohstoffe, z.B. Stärke.

Die weltweite, sowie die deutsche Weizenproduktion stiegen in der letzten Dekade stetig an. Sie umfasste 2014 weltweit 220,4 Mio. ha bei einem durchschnittlichen Hektarertrag von 3,31 t ha⁻¹. Deutschlandweit wurde im Jahr 2014 auf 3,21 Mio. ha Weizen bei einem Ertrag von 8,62 t ha⁻¹ angebaut (FAOSTAT 2017). Die hohe Spannbreite der Erträge, die vielseitigen Nutzungsmöglichkeiten sowie die Anpassung von Weizen an klimatische und pedogene Gegebenheiten hatten zur Folge, dass sich weltweit unterschiedliche Weizenanbausysteme etabliert haben. In Westeuropa stellt Weizen ein fester Bestandteil im Ackerbau dar. Winterformen überwiegen und vereinzelt sind Sommerformen zu finden. Dementgegen ist in Südeuropa Hartweizen vorherrschend und wird auch meist als Sommerweizen angebaut. Winterweichweizen basiert meist auf einem höheren Input an Betriebsmitteln, realisiert jedoch auch deutlich höhere Kornerträge.

1.2 Die Standortansprüche sowie der Nährstoffbedarf von Weizen

Unter den Getreidearten gilt Weizen als Getreideart, deren Nährstoff- und Standortansprüche als hoch eingestuft werden. So sind die klassischen Weizenanbaugebiete Deutschlands in den Lössregionen oder auch in Norddeutschland in klimatisch kühleren Gebieten zu finden. Durch züchterischen Fortschritt stieg der Kornertrag in den letzten 20

Jahren stetig an und Weizen ist heute auch auf Standorten mit geringerer Bodengüte und reduziertem betrieblichen Input zu finden (CALDERINE and SLAFER 1998, GERVOIS et al. 2008). Zwar kann auf solchen Standorten erfolgreich Weizen angebaut werden, jedoch sind höhere Ertragsschwankungen hinzunehmen.

Je nach Standort ist es wichtig, die optimale Bodenreaktion von 6,4-7,3 anzustreben (BROUWER 1972). Winterweizen zeigt eine gute Winterfestigkeit, eine Toleranz gegen zeitweilige Staunässe (bis in die Jugendentwicklung), aber auch einen ausgeprägten Vernalisationsbedarf (HAUMANN und DIETSCH 2000, S. 277). Die Klima- und Niederschlagsverhältnisse zeigen bei Weizen einen großen Einfluss auf die Ertragsbildung. Weizen zeigt einen relativ hohen Wasserverbrauch (Transpirationskoeffizient von 500) (REINER et al. 1992). Im Zusammenhang mit der relativ späten Entwicklung fällt die Hauptwachstumsphase eher in die wärmeren Frühsommermonate (Mai-Juni). Dies kann gerade in der kritischen Phase (Schossen bis zur Blüte) zu Trockenstress führen, was zu geringen Tausendkornmassen führen kann (REINER et al. 1992; GOODING et al. 2003; GATE 2007).

Auf Standorten mit geringer nutzbarer Feldkapazität (nFK) sollte der Fokus auf einem wassersparenden Anbau wie, z.B., frühe Saat, dünne Bestände sowie einer verhaltenen N-Düngung liegen (HAUMANN und DIETSCH 2000, S. 279).

Die geringe Selbstverträglichkeit von Weizen resultiert einerseits aus der Übertragung von Krankheiten aus den Stoppelresten der Vorfrucht, dies ist insbesondere bei konservierenden Bodenbearbeitungsverfahren der Fall (WAALWIJK et al. 2003; KOCH et al. 2006). Darunter fallen, z.B., Schwarzbeinigkeit (*Gaeummanomyces graminis*), Halmbruchkrankheiten (*Pseudocercospora herpotrichoides*), Blatt- (*Septoria tritici*) und Ährenseptoria (*Septoria nodorum*). Andererseits zeigen Böden nach Weizenanbau eine schlechtere Bodenstruktur und einen geringeren Stoffumsatz als bei einer Blattfrucht (FREYER 2003, S. 47). Diese Effekte sind auch nur bedingt mit pflanzenbaulichen Maßnahmen wie, z.B., Zwischenfrüchten auszugleichen. So zeigt wiederholter Weizenanbau teilweise bis zu 35 % Ertragseinbußen gegenüber Weizen in einer Fruchtfolge (GLIEMROTH und KÜBLER 1972). Gute Vorfrüchte zu Weizen sind Mais, Kartoffeln und Rüben, aber auch Leguminosen (BAEUMER 1992). Da Weizens spät im Herbst ab Mitte Oktober gesät wird, ist auch die Menge an N, die Weizen im Herbst aufnimmt, gering (10-30 kg ha⁻¹). Folglich bringen die letztgenannten Vorfrüchte auch Risiken mit sich, da mineralisierter N von Weizen nicht in ausreichender Menge

aufgenommen und schließlich über Verlustpfade entweichen kann. Von den Getreidearten gilt Hafer als beste Vorfrucht, da Hafer eine relativ geringe Belastung an Getreidekrankheiten aufweist (FREYER 2003, S. 46).

Generell bedarf es für hohe Erträge eine optimale Nährstoffversorgung, die nur durch eine Bedarfsberechnung zu erreichen ist. Die wichtigsten Elemente dazu sind der zu erwartende Entzug über die Ernteprodukte sowie die Nährstoffgehalte im Boden und deren Nachlieferung.

Im Vergleich zu anderen Getreidearten zeigt Weizen einen hohen N-Bedarf. Gerade auch im Hinblick auf das Produktionsziel ist die N-Düngung bei Weizen sowie deren Aufteilung ein wichtiger Faktor für das Erreichen von Ertrags- und Qualitätszielen. Bei keiner anderen Getreideart wird das Augenmerk so stark auf eine ausgeglichene, in Gaben aufgeteilte N-Düngung gelegt wie bei Weizen. Ein Großteil des nach der Blüte benötigten N wird jedoch bereits vor der Blüte aufgenommen und schließlich umverlagert (DUPONT and ALTENBACH 2003; XU et al. 2005; BARBOTTIN et al. 2005; AUSTIN and JONES 1975; AUSTIN et al. 1977; PAPAOKOSTA and GAGIANAS 1991). Ebenfalls bleibt anzumerken, dass durch die zwar vermehrt aber sehr lokal auftretenden Frühsommertrockenheiten die Düngung zur Kornfüllungsphase nur beschränkt erfolgswirksam ist. Gerade in solchen abiotischen Stressphasen ist die Produktivität reduziert (PORTER and GAWITH 1999; YANG et al. 2002; BARNABA' s et al. 2008), was auch eine reduzierte Nutzungseffizienz des applizierten N vermuten lässt. Gerade in der Kornfüllungsphase in Zusammenhang mit der durch Trockenstress reduzierten Aufnahme des Boden-N stellt die Umverlagerung von N eine wichtige Quelle dar (DALLING et al. 1975; AUSTIN et al. 1977; HEITHOLT et al. 1990).

Zudem zeigt Weizen einen engen Zusammenhang zwischen Phosphat-Düngung und Ertrag. Eine Kalidüngung zeigt weniger Ertragswirksamkeit, jedoch positiven Einfluss auf die Qualität. Ebenfalls wurden positive Ertragseffekte bei einer ausreichenden Magnesiumversorgung festgestellt. Bei einem hohen Ertragsniveau und insbesondere auf schwefelarmen, leichten Böden ist eine Schwefeldüngung zur Sicherung der Rohproteingehalte ebenfalls erfolgsversprechend (LAMOND et al. 1991; SAKAL 1995; JÄRVAN et al. 2012; ÇAKMAK et al. 2013). Untersuchungen zeigen ebenfalls eine positive Wirkung von Schwefel auf die Zusammensetzung der Glutenproteine, die wiederum positiv auf die Backeigenschaften Einfluss nehmen (MOSS et al. 1983; WITHERS et al. 1995; WIESER et al. 2004).

1.3 Die Ertragsbildung von Weizen

Die Ertragsbildung von Weizen ist ein komplexes Zusammenspiel der drei Ertragskomponenten: ährentragende Halme, Kornzahl Ähre⁻¹ und der Tausendkornmasse. Je nach Umweltbedingungen können sich bei Weizen bis zum Beginn des Schossens bis zu 2000 Triebe m⁻² bilden. Von den Standortbedingungen abhängig können diese bis BBCH 39/40 auf ca. 20-30 % reduziert werden (VOLLMER 1986). Dies ist in der Konkurrenz um die Wachstumsfaktoren wie, z.B., Licht, Wasser und Nährstoffe begründet. Umso stärker die Konkurrenz um die Wachstumsfaktoren ist, desto größer sind die Reduktionsprozesse, die aber bis zum Zeitpunkt des Ährenschiebens abgeschlossen sind (VOLLMER 1986). Als optimale Bestandesdichte ist je nach Sorte und Standort sowie dem Saattermin und Saatstärke, zwischen 400 – 600 Ähren m⁻² anzusehen. Ein wichtiger Faktor für den Aufbau der Bestandesdichte ist zudem die N-Versorgung, worauf jedoch im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

Die Reduktion von ertragsmindernden Prozessen ist eines der Ziele einer erfolgreichen Bestandesführung bei Winterweizen. Eine ausreichende Versorgung mit Nährstoffen erhöht die Fertilität und hemmt die Reduktion von Ährchen und Blütchen. Untersuchungen zeigten Zusammenhänge zwischen einer zunehmenden Bestandesdichte und einer damit einhergehenden Reduktion der Korngröße (MOTZO et al. 2004) sowie der Anzahl an Körner Ähre⁻¹ (MAIDL et al. 1998). Daten aus der Auswertung von 10-jährigen Landesortenversuchen zeigten eine Maximierung des Kornertrags bei ca. 40 Körner Ähre⁻¹ (REINER et al. 1992, S. 52). Die letzte Ertragskomponente stellt die Tausendkornmasse (TKM) dar. Diese wird maßgeblich durch einen ungehinderten Stofffluss ermöglicht. Maßgeblich für die Assimilatbildung sind das Fahnenblatt, die Ähre selbst und das zweitoberste Blatt. Alle Maßnahmen, die die Pflanzen gesund erhalten und die Abreife verzögern, fördern demnach die Einlagerung von Assimilaten in die Körner.

Eine standortgerechte Bestandesführung beinhaltet schließlich eine optimale Versorgung mit Nährstoffen im Hinblick auf das Ertragspotential des Standorts. Daraus sind Düngestrategien entstanden, die im folgenden Abschnitt erläutert werden.

1.4 Die Sorteneigenschaften und Qualität von Weizen

Weizen unterliegt wie alle landwirtschaftlichen Kulturen einem ständigen züchterischen Fortschritt. Zuchtziele sind, z.B., verbesserte Krankheitsresistenzen oder Toleranzen, höhere Kornerträge und Rohproteingehalte, geringe Lagerneigung oder auch niedrigere Harvest-Indizes.

Aus der Thematik Lagerneigung wurde das Merkmal Harvest-Index, insbesondere die Strohlänge, in den letzten Dekaden züchterisch bearbeitet. Das Resultat sind die heute vorhandenen kurzstrohigen und standfesten Sorten (AUSTIN et al. 1980; SINCLAR 1998). Auch die Erträge und Rohproteingehalte sind stetig gestiegen. Nach DONALD 1981 ist die Kornmasse im Vergleich der „alten“ zu den „modernen“ Sorten von ca. 20 auf 40-45 mg gestiegen. Neben diesen Zuchtzielen ist aber auch eine hohe Plastizität der Ertragskomponenten, z.B., der Anzahl an Körner Ähre⁻¹ ein Ziel der züchterischen Arbeit (SADRAS 2007). Das Boniturschema der Beschreibenden Sortenliste (BSL) verwendet die Ausprägungsstufen 1-9 (1=sehr niedrig, 5=mittel, 9= sehr hoch). Die Betrachtung der BSL lässt den Schluss zu, dass die Variationsbreite der Ausprägung von Ertragskomponenten (Ährentragende Halme, Körner Ähre⁻¹, Tausendkornmasse) in den letzten Dekaden stetig abgenommen hat. Die verbreiteten Sorten scheinen vermehrt eine Kompensationsfähigkeit zu besitzen. Die Ausprägung von Ertragskomponenten, welche in der BSL mit den Noten 1-9 eingestuft wird, kann heute allenfalls als Neigung beschrieben werden. Der größte Anteil der gelisteten Sorten ist mit den Noten 4-6 eingestuft (Bundessortenamt 2017). Einschränkend muss hier angemerkt werden, dass die Boniturschemen einer stetigen Anpassung unterlagen. Der direkte Vergleich von älteren mit neueren Sorten ist somit nicht möglich.

Eine Vielzahl von Indikatoren und Messgrößen sind an den Qualitätsmerkmalen von Weizen beteiligt. Darunter, z.B. die Volumenausbeute, die Elastizität und die Oberflächenbeschaffenheit des Teiges sowie die Wasseraufnahme und Mehlausbeute. In der Praxis geht es im Wesentlichen um drei Größen. Dies sind die Fallzahl (Maß für die Proteinqualität), der Sedimentationswert (Maß für den Auswuchs) und der Rohproteingehalt. Gerade die Klassengrenzen des Proteingehalts unterliegen einer ständigen Anpassung aufgrund züchterischen Fortschritts sowie einer Anpassung auf Marktsituationen seitens der Getreideerfasser. Momentan muss E-Weizen 14,0-14,5 %, A-Weizen >13,0 % und B-Weizen >12,0 % Rohprotein in der Korntrockenmasse aufweisen (RENTEL 2017).

Zwar beeinflusst die N-Düngung den absoluten Proteingehalt maßgeblich, jedoch ist die Proteinqualität (Glutenzusammensetzung) und der Sedimentationswert maßgeblich genetisch bzw. sortenspezifisch angelegt (JOHNSON et al. 1972; JOHANSSON and SVENSSON 1998; PETERSEN et al. 1998; UHLEN et al. 2004). Diese Zusammenhänge in Verbindung mit der oft diskutierten geringen N-Nutzungseffizienz der Qualitätsdüngung geben unter anderem den Anlass, dass die Qualitätseinstufung momentan neu untersucht wird (ZÖRB et al. 2009; GABRIEL et al. 2017).

1.5 Die N-Düngung von Weizen in der Praxis

Weizen als Kultur mit der Vielzahl der genannten Verwendungsmöglichkeiten sowie den Sorteneigenschaften und den unterschiedlichen Qualitätsaspekten stellt an die N-Versorgung hohe Ansprüche. Aus dem Wissen der physiologisch wichtigen Wachstumsstadien ist eine für Winterweizen typisch geteilte Düngung entstanden (HAMID 1972; ALCOZ et al. 1993).

Prinzipiell wird der gesamte N-Bedarf gemäß Düngebedarfsprognose zu den einzelnen Wachstumsstadien appliziert. Dieses geteilte Düngungsverfahren ist in Deutschland in Verbindung mit Kalkammonsalpeter (KAS, 27 % N) sehr weit verbreitet. Nach der Aussaat, die in weiten Teilen Deutschlands meist ab Mitte Oktober stattfindet, findet keine N-Düngung mehr statt. Bis zum Winter nimmt Weizen auch in der Regel nicht mehr als 10-20 kg N ha⁻¹ auf. Solch geringe N-Mengen sind meist noch als Nachernte-N_{min} der Vorfrucht zu finden. Gerade auch die ökonomische Vorzüglichkeit des Weizens führt dazu, dass dieser oft nach Winterraps oder Zuckerrüben sowie Silomais angebaut wird. Winterraps und Zuckerrüben hinterlassen schnell umsetzbare organische Substanz. Silomais wird oft mit Wirtschaftsdünger gedüngt, sodass auch hier genügend N zur Verfügung steht. Körnermais oder auch andere Getreidearten sind diesbezüglich als schwächer einzuordnen. In der Praxis hat sich jedoch unabhängig von der Vorfrucht ein Auslassen der Herbsdüngung zu Winterweizen durchgesetzt. Die erste Gabe, die oft ca. 30-40 % des gesamten N-Düngebedarfs beinhaltet wird meist Mitte der Bestockung (BBCH 25) oder etwas früher appliziert. Mit dieser wird das Ziel verfolgt, schwach bestockte Bestände rasch im Wachstum anzuregen, sodass die notwendige Bestandesdichte schnell erreicht wird. Untersuchungen

zeigten aber ebenfalls eine Reduktion von Ertragsanlagen bei hohen N-Mengen, die früh appliziert wurden (GOODING and DAVIES 1997; MAIDL et al. 1998). Dies erklärt mitunter die Begrenzung der N-Menge auf oft 30-40 % des N-Bedarfs. Die zweite N-Gabe mit ebenfalls ca. 30-40 % des N-Düngebedarfs wird oft zu Beginn des Schossens (BBCH 29/31) appliziert. Diese Düngung fällt somit in den Beginn des Massenwachstums. Weiter werden gerade in dieser Phase die Ährchen bereits determiniert. Ein N-Mangel zu diesem Zeitpunkt würde sich negativ auf die Anzahl an Körner Ähre⁻¹ auswirken. Auch können zu diesem Zeitpunkt hohe Aufnahmen an löslichem N zu rasantem Wachstum der Internodien führen, was insbesondere bei Sorten mit einem geringen Harvest Index die Gefahr von Lagergetreide erhöht (GERWING et al. 1979; KANWAR et al. 1988; VARSHNEY et al. 1993). Auch dies führt im Allgemeinen zur Empfehlung von geteilten N-Gaben (LÓPEZ-BELLIDO et al. 2005).

Die dritte N-Gabe wird von Landwirten oft zu Beginn des Ährenschiebens (BBCH 49/51) appliziert. Ziel dieser Gabe ist es, dem Weizen zur Kornfüllungsphase genügend N zur Verfügung zu stellen, damit ausreichend hohe Rohproteingehalte erzeugt werden und die Tausendkornmasse maximiert wird. Einige Landwirte teilen diese Gabe wiederum auf und applizieren nach BBCH 59/61 nochmals N, da von dieser sehr späten N-Gabe eine besondere Wirkung auf den Rohproteingehalt erwartet wird (HAUMANN und DIETSCH 2000, S. 303).

Ziel dieser Gabenaufteilung ist es den Weizen zu jeder Wachstumsphase adäquat mit N zu versorgen, den Gehalt an löslichen N im Boden und den Bedarf der Pflanze zu synchronisieren (STICKSEL et al. 2000; GOLBA et al. 2013) sowie die N-Nutzungseffizienz zu erhöhen (FOX et al. 1986). Unabhängig vom Betriebssystem und dem Produktionsziel wird dieses Düngungsverfahren deutschlandweit auf sehr vielen Betrieben angewendet. Demgegenüber stehen jedoch Untersuchungen, die eine reduzierte N-Nutzungseffizienz aufgrund von Trockenstress gerade zur Applikation der Qualitätsgabe (BBCH 49/51) darlegen (HARTMANN and NYBORG 1989).

1.6 Die Notwendigkeit sowie Alternativen einer geteilten N-Düngung

Das erläuterte geteilte N-Düngungsverfahren findet eine sehr breite Anwendung und wird als notwendig für das Erreichen von Ertrags- und Qualitätszielen angesehen.

Eines der ersten Düngeverfahren mit einer geringeren Anzahl an N-Applikation sowie einer anderen Düngeform war das CULTAN-Verfahren (Controlled-Uptake-Long-Term-Ammonium-Nutrition). Hierbei werden reine Ammoniumdünger oder sehr nitratarme Dünger unter der

Pflanzenwurzel punkt- oder streifenförmig abgelegt. Die toxische Ammoniumkonzentration bewirkt schließlich eine reduzierte Nitrifikation und verfolgt das Ziel, dass die Pflanze sich vordergründig aus dem Randbereich des Depots mit Ammonium ernährt (SOMMER 2005). Weiter sind in der Praxis Abwandlungen dieses Verfahrens zu finden. Hierbei wird, z.B., Ammonium-Nitrat-Harnstoff-Lösung (AHL, 28 % N) bandförmig an der Oberfläche abgelegt. Betriebe nutzen auch Düngeverfahren mit reinem Harnstoff (46 % N). Diese arbeiten teilweise bereits gabenreduziert und düngen Weizen mit nur zwei N-Teilgaben. Um dem Ziel einer Gabenreduktion gerecht zu werden, verwenden manche Betriebe auch N-Düngemittel mit Nitrifikationshemmstoffen. Darunter z.B., das bekannte Produkt ENTEC 26®. Damit wird die Nitrifikation des enthaltenen Ammoniums reduziert. Der Pflanze steht demnach mehr Ammonium zur Verfügung und die Nitratkonzentrationen sind als geringer einzuordnen als, z.B., nach einer KAS-Düngung. Zwar enthält KAS 50 % des N als Ammonium-N und 50 % als Nitrat-N, jedoch ist bei feucht warmen Bedingungen eine schnelle Nitrifikation zu erwarten. Gerade in frühen Wachstumsstadien (BBCH 25), in denen die N-Aufnahme noch gering ist, kann es demnach durch eine stetige Nitrifikation des Ammoniums zu einem relativ hohen Nitrat-Angebot kommen.

Als eine weitere Möglichkeit N-Teilgaben einzusparen, ist Harnstoff zu nennen, der mit UREASE-Hemmstoffen versehen ist. Diese Hemmstoffe bewirken eine reduzierte Hydrolyse, sodass auch der weitere Umwandlungsprozess von Ammonium zu Nitrat verlangsamt ist.

Ein Hemmnis der erwähnten alternativen Verfahren zur N-Düngung von Winterweizen ist oft die praktische Durchführung sowie der Preis je kg N. Gerade für das CULTAN Verfahren bedarf es eines hohen technischen Aufwands. Verfahren mit alternativen Düngemittel werden von Landwirten oft isoliert am Preis je kg N bemessen, ohne die Vorteile der reduzierten Überfahrten mit einzubeziehen.

Ein Aspekt für solche Verfahren oder eine generelle Gabenreduktion der Düngung ist jedoch die oft vorzufindende betriebliche Situation. Für spezialisierte Marktfruchtbetriebe mit schlagkräftiger Technik und detailliert festgelegte Qualitätsvereinbarungen stellt die Düngung und das Erreichen von Ertrags- und Qualitätszielen der maßgebliche Faktor für wirtschaftlichen Erfolg dar.

Trotz dessen können gerade bei großen Betrieben auch große monetäre Vorteile bei dem Auslassen von Düngegaben wahrgenommen werden. Dies ist jedoch eine einzelbetriebliche Entscheidung und hängt auch davon ab, welche Kosten in die Gesamtkosten der

Düngerausbringung mit eingerechnet werden. Gerade in familiengeführten Gemischtbetrieben mit Großviehhaltung oder Veredelung wird oft der Lohnansatz der eigenen Arbeit nicht mit betrachtet. Solche Betriebe sind meist eher extensiv mechanisiert und das Ziel besteht in der Produktion von hochwertigem Futter mit geringen Kosten. Auch bürden Feldarbeiten die Gefahr, dass Routinearbeiten in der Tierhaltung nur suboptimal erledigt werden. Durch, z.B., eine gabenreduzierte Düngung jeglicher Art könnten in solchen Betrieben einige Arbeitsspitzen entzerrt werden. Trotzdem wenden auch diese Betriebe oftmals die arbeitszeitintensive mehrmals geteilte N-Düngung für Weizen an. Die Flächen solcher Betriebe sind oft langjährig mit Wirtschaftsdünger versorgt, was zu einem generell höheren Niveau an verfügbarem N im Boden führt (ZAMAN et al. 2004; MALLORY and GRIFFIN 2007). Effekte durch Finessen im Bereich der N-Düngung durch, z.B., aufwändige Gabenaufteilungen sind demnach eher nicht zu erwarten. Untermauert wird dies von MÜLLER et al. 1990, die darlegen, dass der Effekt einer Gabenaufteilung reduziert wird, sofern der N-Gesamtbedarf gedeckt ist. Ergebnisse aus Praxisversuchen bei Landwirten zeigen dies ebenfalls (SCHULZ et al. 2014) und gaben Anlass, die Notwendigkeit einer geteilten Düngung weiter zu untersuchen. In diesen Praxisversuchen wurden neben den erwähnten Verfahren auch gabenreduzierte Düngeverfahren mit KAS oder AHL erprobt. Erste Ergebnisse zeigten ein Funktionieren solchen Verfahren. Anhand dieser Versuche konnten jedoch nicht die maßgeblichen Faktoren für das Funktionieren von gabenreduzierten Düngeverfahren analysiert werden.

Insbesondere die Untersuchung dieser Faktoren, die scheinbar wichtig für das Gelingen von gabenreduzierten Düngeverfahren sind, waren Gegenstand weiterer Versuche und die Basis folgender Zielsetzung.

1.7 Ziele der Arbeit

Neben der Frage der generellen Notwendigkeit einer geteilten N-Düngung mit KAS zu Winterweizen wurde die Klärung nachfolgender Versuchsfragen als Zielsetzung definiert. Inhaltlich sind diese Versuchsfragen anhand konkreter Hypothesen in den einzelnen Artikeln bearbeitet worden. Da bei einigen Betrieben in der Praxis AHL als Dünger eingesetzt wird, wurde begleitend in einigen Versuchen eine Variante mit AHL getestet. Bei der Interpretation der Ergebnisse wurde jedoch diese Variante, insbesondere unter Punkt 2.3 (Kapitel 3), nur am Rande betrachtet.

1. Sind durch Sorten mit einer hohen Kompensationsfähigkeit gabenreduzierte N-Düngeverfahren mit KAS möglich?
2. Inwieweit kompensieren Weizensorten mit einer Neigung zum Bestandesdichtetyp oder Einzelährentyp ausgelassene bzw. zusammengefasste Düngetermine mit KAS?
3. Erbringen gabenreduzierte Düngeverfahren die gleichen Erträge und Rohproteingehalte wie eine dreigeteilte Düngung mit KAS?
4. Inwieweit beeinflusst das Mineralisationspotential von langjährig mit flüssigen Wirtschaftsdünger versorgten Böden das Funktionieren von gabenreduzierten Düngeverfahren mit KAS?
5. Haben gabenreduzierte N-Düngeverfahren mit KAS Einfluss auf den Gehalt an Nach-Ernte N_{\min} sowie die N-Abfuhr?

2 Publikationen (Kapitel 1, 2, 3)

Inhalt der vorliegenden Arbeit sind **drei** Artikel für die Veröffentlichung in wissenschaftlich referierten Journals.

Einer der Artikel ist bereits im „*Journal of Agricultural Science*“ veröffentlicht.

Zwei weitere Artikel befinden sich beim Journal „*Archives of Agronomy and Soil Science*“ im Status submitted.

Nachfolgend wird grundlegend für jeden Artikel kurz die Datengrundlage und Zielsetzung erläutert.

Weiter wurden im Rahmen der vorliegenden Dissertation **zehn** Beiträge in Form von Vorträgen und Posterbeiträgen sowie **sechs** Artikel in Fachzeitschriften angefertigt.

Einige dieser Daten stammen auch aus zusätzlich Versuchen, die im Rahmen einer Bachelor- oder Masterarbeit betreut wurden.

Die detaillierte Liste dazu befindet sich im Anschluss der Arbeit.

2.1 Kapitel 1:

Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany.

Acceptet 21. März 2014, Journal of Agricultural Science (2015), 153, 575–587.

(doi:10.1017/S0021859614000288),

ISSN: 0021-8596

Inhalt dieses Artikels sind Ergebnisse von On-Farm Versuchen mit Winterweizen, die vier Jahre lang auf bis zu 36 Flächen bei bis zu 19 Landwirten durchgeführt worden sind und schließlich statistisch als Streulage ausgewertet wurden. Die sehr breite Datengrundlage zeigte das Funktionieren von gabenreduzierten Düngeverfahren. Schwerpunkt lag auf der Ableitung der Rahmenbedingungen von „gabenreduzierten“ Düngeverfahren. Aufbauend auf diesen Versuchen wurden schließlich Experimente für Kapitel drei und vier angelegt. Ein maßgeblicher Einfluss der Eigenschaften moderner Weizensorten als auch die Eigenschaften des Standorts konnten für das Funktionieren gabenreduzierter Düngeverfahren definiert werden. Dies gab Anlass, insbesondere die Eigenschaften von heutigen Winterweizensorten als auch den Einfluss des N-Nachlieferungspotential in weiteren Feldversuchen zu untersuchen.

Authors:

Rudolf Schulz¹, Thomas Makary¹, Sabine Huber², Karin Hartung³, Sabine Gruber⁴, Sebastian Donath¹, Johannes Döhler¹, Katharina Weiß⁵, Elisabeth Ehrhart⁶, Wilhelm Claupein⁴, Hans-Peter Piepho³, Carola Pekrun⁴ and Torsten Müller^{1*}

¹ Institute of Crop Science: Fertilization and Soil Matter Dynamics (340i), University of Hohenheim, D-70593 Stuttgart, Germany

² Nuertingen-Geislingen University, Agronomy, D-72622 Nürtingen, Germany

³ Institute of Crop Science: Bioinformatics (340c), University of Hohenheim, D-70593 Stuttgart, Germany

⁴ Institute of Crop Science: Agronomy (340a), University of Hohenheim, D-70593 Stuttgart, Germany

⁵ Landratsamt Tübingen, 72072 Tübingen, Germany

⁶ Regierungspräsidium Tübingen, 72072 Tübingen, Germany

Corresponding author:

Rudolf Schulz, Institute of Crop Science, Fertilization and Soil Matter Dynamics, University of Hohenheim, 70593 Stuttgart, Germany; E-mail: Rudolf.Schulz@uni-hohenheim.de

Summary

Mineral nitrogen (N) fertilization in cereals is commonly split into three or four applications. In order to simplify N fertilization, a single N application either broadcast or placed on the soil surface was compared to conventionally split fertilization for winter wheat (*Triticum aestivum* L.). The 4-year experiment (2007–2010) was performed using a participatory approach on farmers' fields on deep loamy soils (Luvisols) in South-West Germany.

Grain yield and crude protein contents differed only slightly or not at all between treatments including different N fertilizer types (calcium ammonium nitrate, urea ammonium nitrate solution, urea) and application techniques (broadcast, placed). Furthermore, no differences were found for the yield components ears/m² and thousand grain weight. Inorganic N in the soil profile after harvest was generally below 40 kg N/ha and did not differ between treatments. In the area where N was placed, mineral N was depleted during the vegetation period.

At the experimental sites a single N application in the period between tillering and stem elongation was sufficient to achieve high yield and quality of winter wheat without increased risk of nitrate leaching. This finding was independent of the method of application or the type of fertilizer.

Introduction

Increasing farm sizes with low manpower, increasing energy costs and ecological problems due to (N) losses call for improved and simplified N fertilization. At present, management guidelines for cereals in Europe and the USA include recommendations for split application of mineral N. Splitting the fertilization into three or four doses is supposed to support specific yield components depending on the time of application and the corresponding stages of plant development (HAMID 1972; ALCOZ *et al.* 1993). Furthermore, a split application is thought to avoid lodging and N losses by leaching (GERWING *et al.* 1979; KANWAR *et al.* 1988; VARSHNEY *et al.* 1993) because N application and N uptake are balanced both in time and amount.

However, other research indicates that weather conditions and total N supply are more important for yield and crude protein contents of cereals than splitting and the timing of applications (FISCHBECK *et al.* 1990; ALCOZ *et al.* 1993; MAIDL *et al.* 1996). The effect of a split-N application on yield and quality of wheat is low if the total amount of N is sufficient (MÜLLER *et al.* 1991) and the last N application might not be taken up effectively by the plants,

particularly under dry weather conditions in May and June, at the heading stage (HARTMAN & NYBORG 1989).

According to Fox *et al.* (1986) the timing of N application is an important factor for increasing N use efficiency (NUE). Nitrogen use efficiency is increased if N fertilization is restrained until tillering, but ample in the growth stages (GS) 30–39 (ZADOKS *et al.* 1974; MAIDL *et al.* 1998; STICKSEL *et al.* 2000). It is thought that a limited N application before tillering avoids disproportionate side shoot production and excessive water consumption. Further, the risk of lodging as a result of rapid stem elongation is lower. However, the yield potential of modern winter wheat genotypes is mainly attributed to a higher partitioning of biomass to the grains, resulting in short stems (AUSTIN *et al.* 1980) and thus reducing the risk of lodging compared to old genotypes.

Decades ago, many cultivars could be characterized as ‘density types’ or ‘ear types’ producing high yields either by a high density of ear-bearing stems (density types) or by a high number of spikelets/ear and a high thousand grain weight (ear type). Consequently, split-N fertilization was aimed at the promotion of single yield components depending on the variety. Modern cultivars, however, can be characterized as ‘compensation types’, where later-developing yield components (e.g. spikelets/ear) can compensate for limitations during the growth of yield components developed earlier (e.g. ear bearing stems/m²), as it was decades ago. This is also visible in the German Descriptive Variety Lists, where the expression of yield components is characterized on a scale between 1 and 9 for each yield component. Extremes are very rare in the current list and all wheat varieties are characterized by medium values between 4 and 6 for at least two of the three yield components (BUNDESSORTENAMT 2012).

To simplify N fertilization, a reduction to one or two broadcast N applications may be an alternative to a traditional N application split into three or four doses. A single broadcast application would offer the advantage that only one pass over the field is needed and that no special application techniques are required, e.g. fertilizer placement.

An alternative to the split-N application is the placed ammonium (NH₄⁺) application, as a modification of the CULTAN-fertilization (Controlled Uptake Long Term Ammonium Nutrition) described by Sommer (2000, 2005). The whole N amount is applied in one single dose in spring, either directly injected into the soil or placed on the soil surface as depots or depot bands with high NH₄⁺ concentration. Typically, this application is done much later than

the traditional first application. This forces the plant to invest in root growth, facilitating nutrient and water uptake at a later stage. As an alternative, a part of the NH_4^+ may be replaced by urea, which is assumed to mineralize quickly to NH_4^+ . A diffusion zone develops concentrically around the depot, from which NH_4^+ and – after nitrification (and following diffusion and mass flow) – nitrate (NO_3^-) can be taken up by plant roots (SCHITTENHELM & MENGE-HARTMANN 2006; MENGE-HARTMANN & SCHITTENHELM 2008). A high share of NH_4^+ uptake in contrast to the usually dominating NO_3^- uptake may affect the distribution of assimilates within the plant, the phytohormone production and the intensity of growth of different organs (SOMMER & SCHERER 2009). An injection of N fertilizer results in lower gaseous N losses and provides an appropriate amount of N under dry conditions, particularly under a soil surface mulch layer in conservation tillage or no-till systems (Liu *et al.* 2006).

To obtain direct and bilateral transfer of knowledge and methodologies, the current investigation was conducted as a joint approach between farmers, local extension service and the university. To address farmers' needs, the main object was to investigate N fertilizing strategies in winter wheat under normal farming practice on farmers' fields. This is in contrast to most of the studies mentioned above, which were based on on-station experiments. Studies on farmers' fields are termed 'on-farm experiments' and aim to obtain practice-orientated results.

Soil nutrients, plot size, equipment, etc. are the main differences between fields within farms and between farms, causing great variations. Hence, for statistical analysis of on-farm experiments, the same requirements as for on-station experiments need to be fulfilled: randomization, replication, blocking (PIEPHO *et al.* 2011).

Thus, the aim of the present study was to investigate strategies for a simplified N fertilization in winter wheat under practice-related conditions on farmers' fields. Besides the traditional three-split applications the alternative strategies tested were one or two applications of broadcast N and a single placed NH_4^+ fertilization. Following the idea of SOMMER (2000, 2005), the single application and the first application of the two times split application should be late, at the end of tillering/beginning of shooting (GS 27–32), when the second application was done for the three times split application.

The following hypotheses, related to the site conditions of the current investigation, were tested: (1) a reduction in the number of N broadcast applications to winter wheat with a late (first) N application does not affect yield and quality, (2) a reduction of the number of N

broadcast applications to winter wheat with a late (first) N application does not increase the risk for NO_3^- leaching losses, and (3) compared to a single broadcast application of N, a single placed depot application of NH_4^+ - and urea-dominated fertilizers leads to higher yields and to a reduced risk for NO_3^- leaching.

Material and methods

Study sites

The investigation was performed over 4 years in two rural districts, Tübingen (48°24'-48°28' N, 8°50'-9°05' E) and Biberach (48°-01'-48°08' N 9°26'-9°46' E), Baden-Württemberg, south-west Germany. Four agricultural farms in 2007, six in 2008, 11 in 2009 and 11 in 2010 took part with one or more fields in the intended fertilization experiments. Each field included three to five plots, and, thus, the same number of fertilization treatments. The size of one plot was c. 100 m long × c. 12–16 m wide, depending on the working width of the farm machinery used and the individual field conditions.

The study sites varied slightly in terms of climatic conditions and altitude above sea level. The experimental fields are characterized as follows: (1) Tübingen: 450 m a.s.l.; average annual temperature: 9–10°C; soil textures: silty loam and clayey loam; (2) Biberach: 550 m a.s.l.; average annual temperature: 8–9°C; soil textures: silty loam and sandy loam. Soil types on 12 farms in both areas were Haplic Luvisols, on three farms Gleyic Luvisols and on two farms Calcic Cambisols. The average annual precipitation (1960–1990) was similar in both rural districts and accounted for 700 (Tübingen) – 800 mm (Biberach). The long-term average climatic water balance (1960–1990) for the hydrological summer half-year was 0–100 mm in Tübingen and 100–200 mm in Biberach (Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg 2012). Since average temperatures and thus evaporation increased in the last two decades and dry springs appeared more often (see the later section on weather conditions), so the risk of nitrate leaching during vegetation period from loamy soils was assumed to be low.

Farmer participatory approach

The experimental setup and fertilization treatments were developed jointly with participating farmers and local extension services, during workshops prior to the start of the experiments. Data from the first experimental year were presented to the farmers as a pre-requisite for modifications in the experimental design of the following years. The final results were presented to the farmers and discussed together after each year.

More than half of the participating farms had livestock. All farms practised conservation soil tillage (no soil inversion by mouldboard ploughing) and none of them used plant growth regulators to avoid lodging. According to the recommendations of the official extension services, available plant nutrients [phosphorus (P), potassium (K), magnesium (Mg) and sulphur (S)] in the soil were at a medium level and thus not expected to limit plant production.

Winter high-protein wheat cultivars chosen by farmers in the 4 years are characterized mainly as compensation types, some with slight tendencies towards plant density or ear types. The preceding crops were oilseed rape, sugar beet, potatoes, pea or winter wheat and, on one field only, strawberries.

Fertilizer treatments

Fertilizer types, application techniques, number of applications, application times and number of replications used in the field experiments are shown in Table 1. At each field, selected treatments were arranged, representing one (incomplete) block (see statistics below). Control plots (small zero fertilization windows) without N fertilization were partially installed, but are not included in the statistical analysis.

The amount of fertilizer N applied on each field was calculated in line with recommendations of the official extension service. This takes into account the expected N demand considering the expected grain yield and crude protein content. The inorganic N already available in soil, sampled in early spring in the 0–90 cm soil layer, was subtracted from the expected N demand, as well as the assumed N delivery from soil during the cultivation period, long-term manure application and plant residues of pre-crops and intermediate crops (DÜNGEVERORDNUNG 2009). The fertilizer N amount for an individual experimental field was always the same for all treatments. The fertilizer N amount was usually in the range 200 ± 20 kg N/ha and only exceptionally lower or higher. As a result, the total N-supply was in the range of 180–260 kg N/ha.

Broadcast fertilizer application was achieved using farmers' broadcast or pneumatic spreaders. Broadcast spreaders were used half-sided so that a single plot was fertilized by an exact overlap of two crossings. Placed surface application (band application) of urea ammonium nitrate solutions was carried out using pesticide sprayers in combination with trackinghoses.

Table 1. *Fertilizer types, application technique, number of applications, application times and number of fields (replicates)*

Treatment No.	Fertilizer types / application technique	No. of applications	Application time (GS)*	Number of fields (replicates)			
				2007	2008	2009	2010
1	Calcium ammonium nitrate (CAN)/ broadcast	3	GS 21–25, 27–32, 47–51	4	3	9	11
2	CAN / broadcast	2	GS 27–32, 47–51			4	8
3	CAN / broadcast	1	GS 27–32	6	4	9	11
4	Urea / broadcast	1	GS 27–32	5	4	4	1
5	Urea ammonium nitrate solution (UAN) / placed (banded)	1	GS 27–32	7	6	5	6

* Growth stage according to the ZADOKS scale (ZADOKS *et al.* 1974)

Weather conditions

Climatic conditions in South-West Germany have changed in recent decades, moving towards higher average annual temperatures and more extreme weather situations including dry conditions in spring and more thunderstorms with heavy rainfall in summer. The average annual temperature in the area of the field experiments at Tübingen increased from 8.8 °C (1961–1990) to 9.9 °C (1991–2010) (Institute of Physics and Meteorology, University of Hohenheim). Therefore, it is worth comparing the weather conditions during the growing season of winter wheat with the mean weather data of the last two decades (1991–2010) (Table 2).

Weather conditions during the cultivation of winter wheat in the 4 years of field experiments were characterized by extremes. In 3 out of the 4 years (2007, 2009, 2010), April was dry and relatively warm, followed by high precipitation in May in 2007 and 2009. There is a trend towards a dry spring in south-west Germany, whereas precipitation as well as temperature in the remaining months was highly variable compared with the average of 1991–2010.

Table 2. Weather conditions 2007–2010 during the main growing season and deviation from mean values of the last two decades 1991–2010. (Institute of Physics and Meteorology, University of Hohenheim)

Year	Month	Temperature	Deviation from long-	Precipitation	Deviation from
		(°C)	term average (°C)	(mm)	long-term average (mm)
2007	March	6.3	+0.6	57.2	+2.9
	April	13.9	+4.2	0.5	−40.8
	May	15.5	+1.4	116.8	+33.5
	June	18.0	+0.8	131.3	+46.6
	July	18.0	−1.0	85.4	−5.0
2008	March	5.1	−0.6	53.2	−1.1
	April	8.4	−1.3	68.0	+26.7
	May	16.0	+1.9	96.4	+13.1
	June	18.0	+0.8	93.9	+9.2
	July	18.8	−0.3	64.5	−25.9
2009	March	4.7	−1.0	82.6	+28.3
	April	12.6	+2.9	17.7	−23.6
	May	15.3	+1.2	129.1	+45.8
	June	16.5	−0.7	76.5	−8.2
	July	18.8	−0.3	140.3	+49.9
2010	March	4.9	−0.8	28.0	−26.3
	April	10.1	+0.4	7.4	−33.9
	May	11.4	−2.7	83.8	+0.5
	June	17.5	+0.3	70.4	−14.3
	July	20.8	+1.7	99.0	+8.6

Data collection

Plant analyses

Harvesting of the individual treatments was performed by combine harvesters with integrated grain yield recording. In addition, in 2007 and 2008 yield components (spikes/m², grains/ear, thousand grain weight) were determined by sampling plants in five (2007) or three sampling points (2008) per treatment in each field, each of which had an area of 0.28 m².

Plant samples were oven dried (60 °C) to constant weight and nitrogen concentrations were analysed with a C/N auto-analyser ('Elementar', model 'vario Max CN', Hanau, Germany). Crude protein content was determined by multiplying N concentration by a factor of 5.7 (TELLER 1932).

Soil analyses

Soil samples for determination of inorganic N (NH_4^+ and NO_3^-) were taken from each field in spring before N fertilization (0–90 cm) and from each plot after harvest (0–90 cm) (VDLUFA 2007). Furthermore, soil samples (0–30 cm) were taken from the centre of an application band of urea ammonium nitrate solution during the vegetation period to determine the concentration of NO_3^- and NH_4^+ in the fertilizer band. Placement bands were labelled in the field immediately after application using plastic sticks to ensure correct soil sampling. Soil samples of each plot and at each time were taken in triplicate. Samples were analysed for inorganic N with a continuous flow analyser (AutoAnalyzer 3, Bran + Luebbe / SEAL Analytical Norderstedt, Germany).

Statistics

The current investigation of N fertilizing strategies in winter wheat was conducted under normal farming practices. A fertilizing strategy (treatment) was defined as a combination of a fertilizer treatment (F) and an application frequency (A). Farmers were allowed to test additional individual fertilizing strategies as long as they also tested some of the fertilizing strategies of interest to the scientific partners (co-treatments). On every field, thus, core treatments appeared together with individual treatments tested on some fields only. The most obvious design for this purpose is the incomplete block design, defining each field as an incomplete block. The different treatments tested on that field are randomized (PIEPHO *et al.*

2011). A pre-requisite for this design is that each block contains at least one treatment which occurs in at least one other block, so that all blocks are connected. The values of yield and crude protein contents were collected in years 2007–2010 on all fields and an ANOVA could be conducted. Soil mineral N and yield components, such as ears/m², grains/ear and thousand grain weight, were collected in the first 2 years but on some fields only, resulting in a poor database. Therefore, only descriptive statistics were used.

On-farm field trial data from 4 years were analysed separately for each year and jointly for all years.

Table 3. Overview of year × farm × field × treatment combinations available in the dataset. Crosses identify the available combinations

Farm	Field	Year	CAN			Urea	UAN
			1 Appl.*	2 Appl.	3 Appl.	1 Appl.	1 Appl.
1	1	2010	x	x	x		x
2	2	2010	x		x		x
3	3	2007			x	x	x
3	4	2008				x	x
3	5	2010	x	x	x		x
4	6	2010	x	x	x		
5	7	2010	x	x	x		
6	8	2008	x		x	x	
6	9	2009	x		x	x	x
6	10	2010	x		x	x	x
7	11	2009	x	x	x		
7	12	2009	x	x	x		
7	13	2010	x	x	x		
8	14	2009	x		x		x
8	15	2010	x		x		
9	16	2007			x	x	x
9	17	2007				x	x
9	18	2010	x	x	x		x
10	19	2008				x	x
10	20	2009	x		x	x	x

11	21	2009	x	x	x		
12	22	2007	x		x	x	x
12	23	2007	x		x	x	x
12	24	2009	x		x	x	
13	25	2007	x		x	x	x
13	26	2007	x		x	x	x
13	27	2008	x		x		x
13	28	2009	x		x		
14	29	2009	x		x	x	
14	30	2010	x	x	x		
15	31	2009					x
16	32	2009					x
17	33	2008			x†		x†
18	34	2008			x		x
18	35	2010	x	x	x		x
19	36	2008				x	x

* Application,† Only data for crude protein was available for farm 17, field 11.

The yield data were collected from 33 fields at 15 farms and the crude protein data from 34 fields at 16 farms. Each field on the farms was used only once over the 4-year period. The trials comprised nine fertilizer treatments (F) and three application frequencies (A). Among the possible treatments formed from factors F and A, up to 14 were tested. Among these 14 combinations, the main focus were five combinations (Table 1), i.e. on calcium ammonium nitrate (CAN) applied once, twice or three times as well as on urea and urea ammonium nitrate solution (UAN) applied once.

For yield and crude protein, all available combinations were used for statistical analyses. The number of treatments tested per field varied between two and six. Due to the design of the on-farm trials, the data were highly unbalanced (Table 3).

The mixed model for a single year was:

$$y = \mu + F + F.A : FIELD + e \quad (1)$$

where y is the dependent variable yield or crude protein; μ the overall mean; F is the main effect of fertilizer; $F.A$ is the nested effect of application frequency (A) within fertilizer; $FIELD$ is the main effect for field and e is a residual error. The colon separates fixed effects, listed first, from random effects. The mixed model across years was:

$$y = \mu + F + F.A : Y + Y.FIELD + F.Y + F.A.Y + e \quad (2)$$

where fixed effects are as defined for Eqn (1) and random effects now include random interaction effects with year (Y) as well as a field effect nested within years ($Y.FIELD$). Wald-type F-tests of fixed effects were performed, adjusting the denominator D.F. using the Kenward-Roger method. The Tukey test, which controls the family-wise type I error rate, was used for mean comparisons among the five treatments. The adjusted means shown in figures are those from the model across years containing all combinations of fertilizer and application frequency. Due to the unbalanced nature of the data, letter displays were generated using the method of PIEPHO (2012).

Table 4. F-tests (fixed effects) and variance component estimates (random effects) for yield and crude protein for analyses across years and per year. For a single year there is no Y × Field effect but only a FIELD effect, but these effects are reported in a single column.

	Fixed effects (F-tests)				Random effects (variance components)				
	Fertilizer		Fertilizer application frequency		Year	Y.FIELD / FIELD	F.Y	F.A.Y	Error term*
	F value	P value	F value	P value					
Yield 2007–2010	0.89	NS	0.78	NS	100.76	132.45	0	0	9.26
Yield 2007	0.03	NS	0.37	NS	–	78.86	–	–	13.44
Yield 2008	1.08	<0.05	0.62	NS	–	54.38	–	–	13.54
Yield 2009	0.10	NS	0.80	NS	–	225.60	–	–	8.91
Yield 2010	0.87	NS	0.63	NS	–	86.03	–	–	12.73
Crude protein 2007–2010	1.58	NS	2.58	NS	1.25	0.99	0.009	0.06	0.29
Crude Protein 2007	8.72	<0.01	2.22	NS	–	0.71	–	–	0.17
Crude Protein 2008	0.39	NS	6.14	<0.05	–	1.06	–	–	0.33
Crude Protein 2009	3.57	NS	3.21	NS	–	0.94	–	–	0.29
Crude Protein 2010	2.22	NS	5.19	<0.05	–	1.09	–	–	0.32

*Residual variance of the model

Results

Wald-type F-tests for fixed effects as well as variance component estimates for random effects are reported in Table 4. The adjusted means are shown in Table 5.

Grain yield

The grain yields of the different fertilization treatments including the N fertilizer types CAN, urea and UAN solution, the number of applications (3× CAN, 1× CAN, 1× urea, 1× UAN) and the different application techniques (CAN and urea broadcast; UAN placed) were not significantly different, either over the period of 4 years (Fig. 1) or in any of the 4 years (data not shown). Yields of the control plots (if existing) were typically between 0.60 and 0.65 of the other treatments. However, due to different weather conditions, the mean yield varied highly between the four years. In 2007, 2008, 2009 and 2010 the average grain yield levels of the core treatments were 8.5, 9.4, 7.0 and 7.3 t DM/ha, respectively.

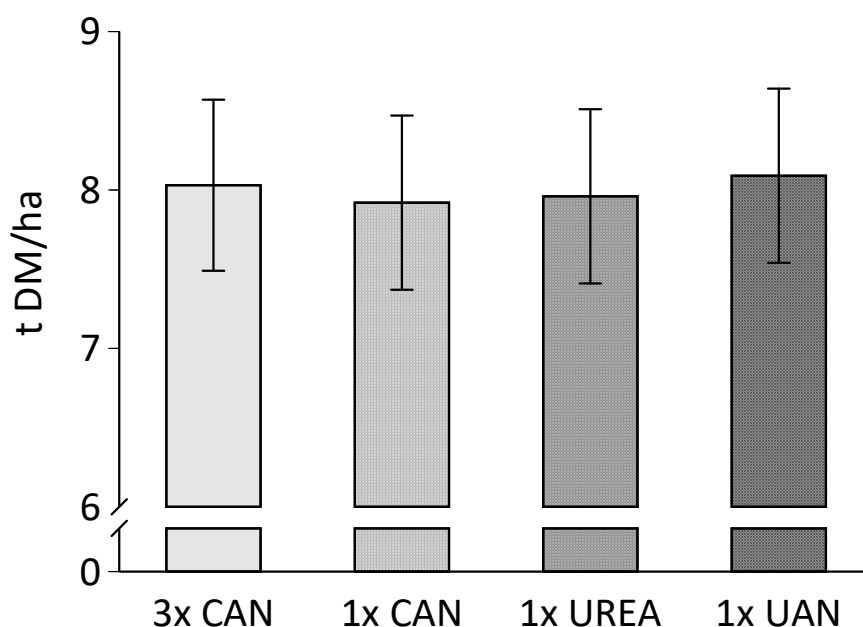


Fig. 1. Mean grain yield of the fertilization treatments calcium ammonium nitrate (CAN), urea and urea ammonium nitrate solution (UAN) 2007–2010. Bars show S.E. of the means.

Although no growth regulators were applied by farmers, no lodging occurred in any of the 4 years, not even after a single application. In some fields, winter wheat plants in the treatments with a reduced number of applications showed clear N deficiency symptoms at the end of tillering. However, c. 3 weeks after the late (first) application, deficiency symptoms disappeared and visual differences between the fertilization treatments could no longer be observed.

Table 5. Adjusted means, mean grouping by letters, (S.E.M) for the five fertilizer treatments for yield and crude protein for analyses across years and per year.

	Fertilizer	No. of Appl.	Mean				
			2007–2010	2007	2008	2009	2010
Yield	CAN	1	79.2 ± 5.47	85.2 ± 3.89	92.8 ± 4.35	68.6 ± 4.67	71.6 ± 3.00
	CAN	2	79.5 ± 5.55	–	–	67.7 ± 4.99	72.7 ± 3.10
	CAN	3	80.3 ± 5.47	83.7 ± 3.70	95.6 ± 3.93	70.0 ± 4.67	73.3 ± 3.00
	Urea	1	79.6 ± 5.50	84.9 ± 3.63	91.6 ± 3.64	69.6 ± 4.84	68.3 ± 4.95
	UAN	1	80.8 ± 5.48	84.9 ± 3.63	95.5 ± 3.46	69.3 ± 4.81	73.7 ± 3.21
Crude protein	CAN	1	13.0 ± 0.62a*	14.2 ± 0.39a	11.1 ± 0.63a	12.5 ± 0.35ab	14.1 ± 0.36a
	CAN	2	13.3 ± 0.66a	–	–	12.9 ± 0.47ab	14.5 ± 0.38ab
	CAN	3	13.6 ± 0.1a	13.8 ± 0.36ab	12.5 ± 0.51a	13.2 ± 0.35a	14.9 ± 0.36b
	Urea	1	12.9 ± 0.62a	13.1 ± 0.35b	11.8 ± 0.51a	11.9 ± 0.42b	15.7 ± 0.72ab
	UAN	1	13.3 ± 0.61a	13.8 ± 0.35a	12.1 ± 0.46a	12.6 ± 0.41ab	14.9 ± 0.40ab

* Means within a column and trait showing a common letter are not significantly different according to a Tukey test.

No significant differences were found for yield.

The two-times split application of CAN was included in 2009 and 2010 only. In both years, there was no difference in grain yield between this treatment and conventional N fertilization applied three times (Fig. 2).

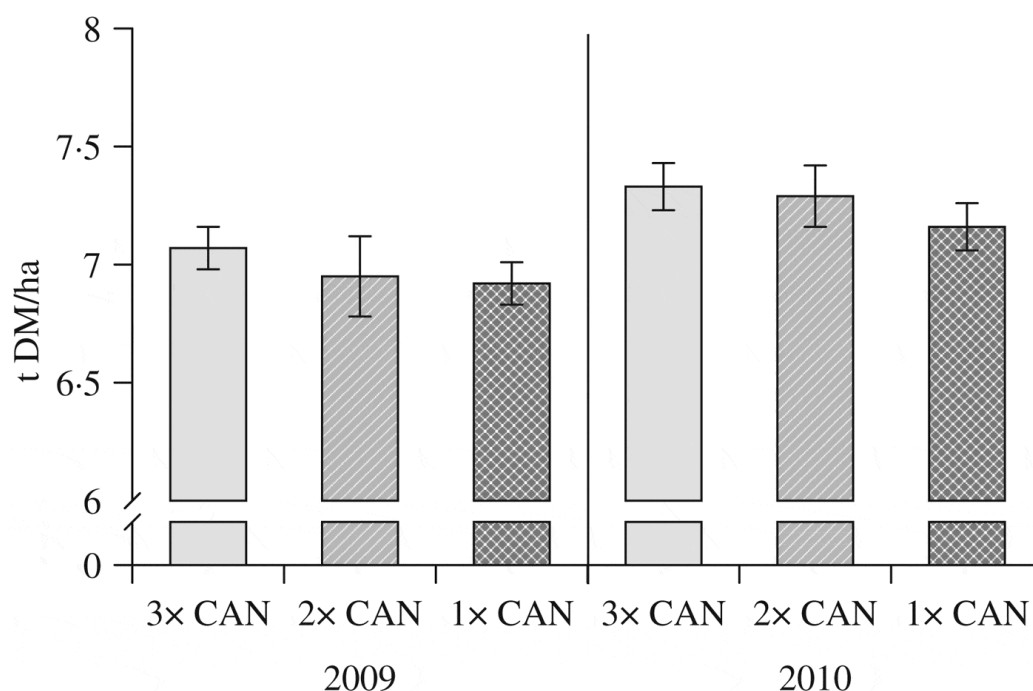


Fig. 2. Grain yield of the split (3x, 2x) and single (1x) applications of calcium ammonium nitrate (CAN) in 2009 and 2010. Bars show S.E. of the means.

Crude protein

There were no significant differences in crude protein contents between the treatments (conventional split application of CAN, single broadcast application of CAN or urea and single placed application of UAN solution) over a period of 4 years (Fig. 3). No significant differences were observed in the individual years either, except in 2010 which had relatively high crude protein contents in all treatments. Here, the crude protein of the single application of CAN was significantly lower than that of the conventional split application (Fig. 4). The mean crude protein levels in 2007, 2008, 2009 and 2010 were 13.7, 11.9, 12.4 and 14.9 %, respectively. In the year with highest grain yield (2008: 9.4 t DM/ha), crude protein was lowest.

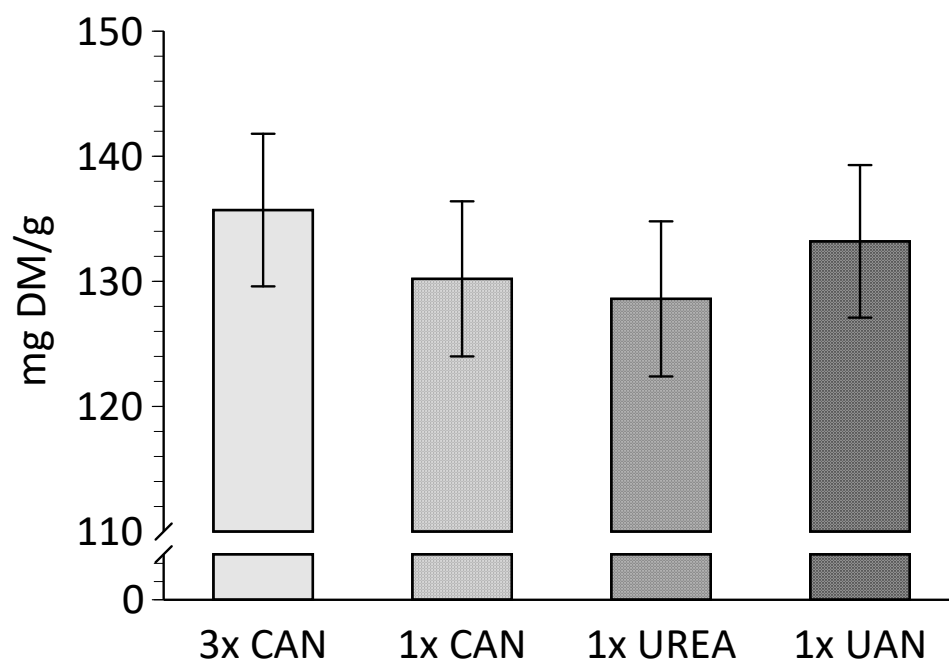


Fig. 3. Mean crude protein content of the fertilization treatments three times (3×) and single application (1×) of calcium ammonium nitrate (CAN), and single application of urea and urea ammonium nitrate solution (UAN) 2007–2010. Bars show S.E. of the means.

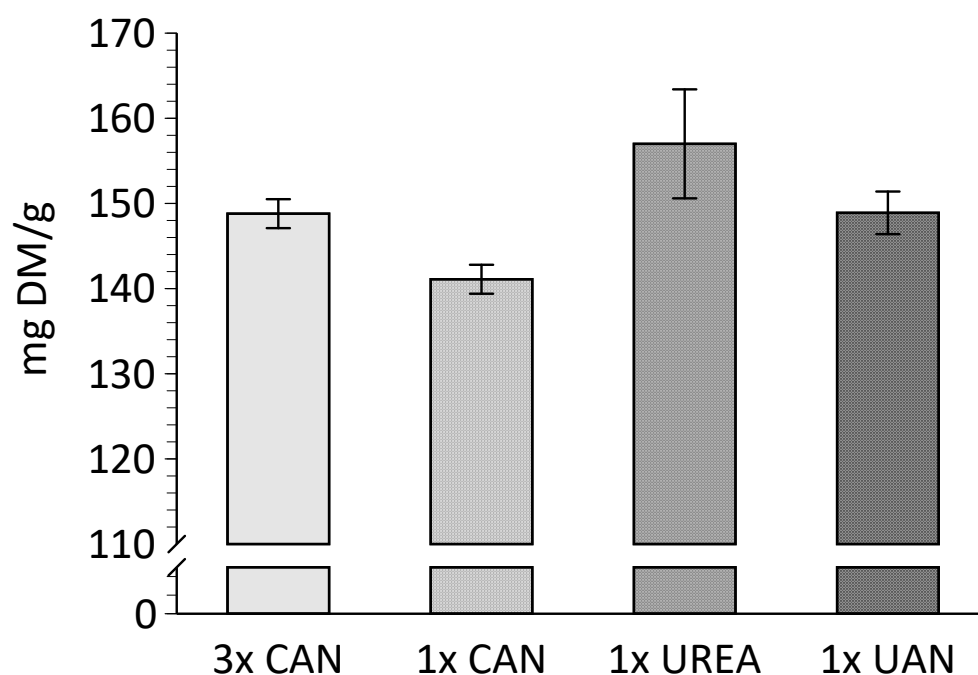


Fig. 4. Crude protein content of the fertilization treatments three times (3×) and single application (1×) of calcium ammonium nitrate (CAN), and single application of urea and urea ammonium nitrate solution (UAN) in 2010. Bars show S.E. of the means.

Yield components were measured in the first 2 years of the field experiments. In 2008, spikes averaged 587 ears/m² with no difference between treatments. In 2007 a mean value

of 39.7 grains/ear was measured, showing higher numbers for the single broadcast application of urea and the single placed application of UAN solution as compared to the conventional split application (data not shown). In contrast, in 2008 no differences appeared between these treatments. The thousand grain weight did not differ between any of the treatments in 2008. An average of 46 g dry weight per thousand grains was measured.

Soil mineral N

The inorganic N after harvest in 2007 and 2008 accounted for < 20 kg N/ha in the top soil (0–30 cm) and < 10 kg N/ha in the 30–60 cm layer, and showed no significant differences between the fertilization treatments in either year (data not shown). In 2009 and 2010, splitting of CAN had no effect on the content of residual inorganic N in the soil profile (Fig. 5).

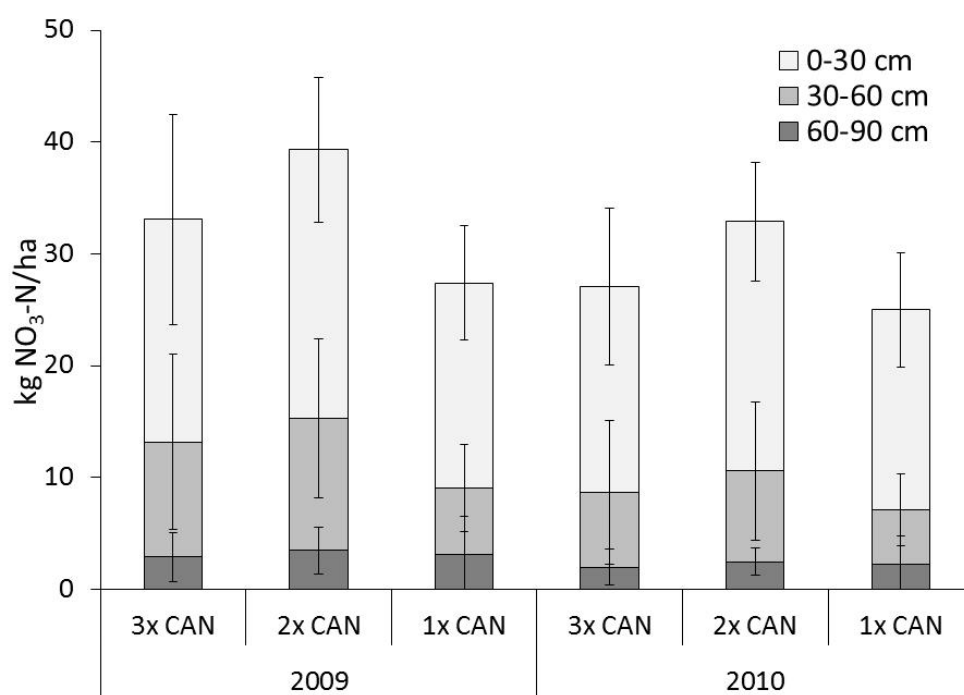


Fig. 5. NO₃⁻-N after harvest in the soil layers 0–30 cm, 30–60 cm and 60–90 cm of the split (3x, 2x) and single (1x) applications of calcium ammonium nitrate (CAN) in 2009 and 2010. Bars show S.D.

The soil samples from the labelled placement bands 10 days after the application of UAN at GS 30–32 showed a concentration of 230 mg inorganic N/kg soil with a proportion of 0.77 NH₄⁺-N in the year 2008 (Fig. 6). Forty days after the placed application, mineral N in the placement band was reduced to 50 mg N/kg soil with a proportion of 0.62 NO₃⁻-N. The soil samples (0–30 cm) from the soil between the placements showed maximum soil values reaching 5 mg NH₄⁺-N and 20 mg NO₃⁻-N/kg soil during the vegetation period (data not

shown). After harvest, the placed area was almost depleted and not significantly different to the other broadcast applied treatments.

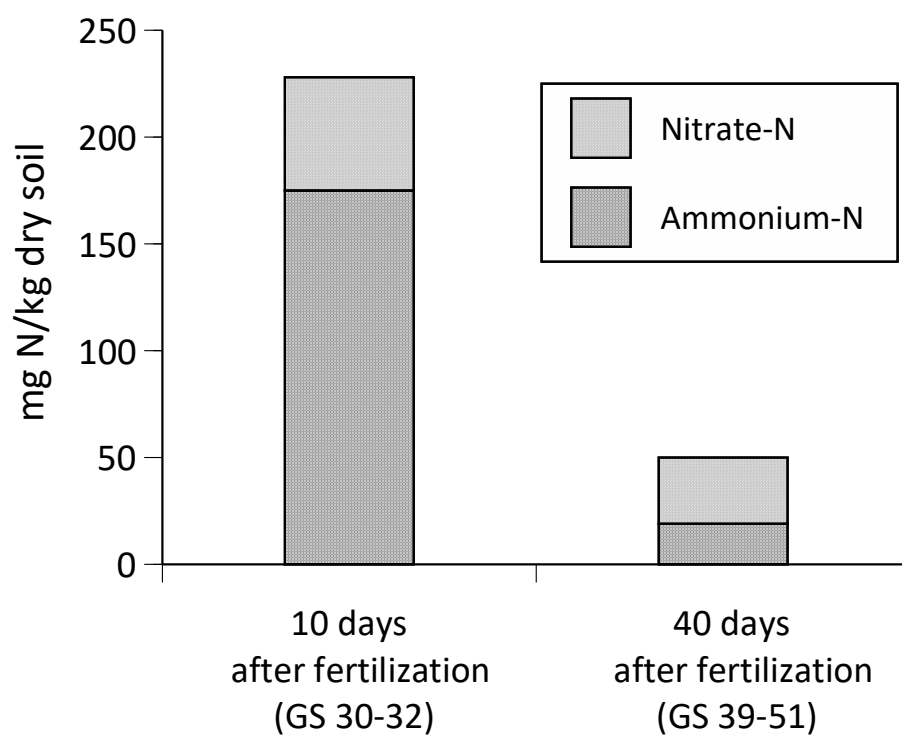


Fig. 6. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the placement band of urea ammonium nitrate solution (UAN) 10 and 40 days after fertilization in 2008.

Discussion

Grain yields between the treatments were not significantly different in any of the 4 years. It seems that a single N application between advanced tillering and beginning of stem elongation, either broadcast or placed, is sufficient to produce high yields on the current experimental sites. Furthermore, there were no significant differences between the fertilizer types CAN, urea and UAN. Consequently, there were no differences in fertilizer N use efficiency if comparing application techniques or fertilizer types. This finding can be attributed to the properties of the experimental sites. Luvisols with loamy texture are characterized by high fertility and high N mineralization potential, enabling winter wheat plants to compensate temporal periods of N deficiency caused by insufficient fertilizer N supply.

Among the other factors affecting yield, weather is the most important variable followed by the total amount of applied N, N application timings and technique (FISCHBECK *et al.* 1990; ALCOZ *et al.* 1993; MAIDL *et al.* 1996). In 3 of the 4 years of the field experiments (2007, 2009, 2010) April was dry and relatively warm. Therefore, it was thought that N fertilization applied during this period would not be as effective as a split application with the first N fertilization already applied in March. Winter wheat plants suffering from N deficiency during stem elongation should develop a smaller number of grains/ear, thus resulting in grain yield reduction. Nevertheless, plants were able to overcome temporary N deficiency as well as drought stress without any negative effect on grain yield. This might have been the effect of high N mineralization potential and water holding capacity of the soils on the experimental sites; however, it showed the potential of modern varieties to compensate for intermediate shortcomings in nutrients and water.

The total amount of N supplied is more important for yield and quality of cereals than split applications (MÜLLER *et al.* 1991). Obviously, the effect of different application times becomes more evident only with insufficient N supply. In the current experiments there were no negative effects of single N applications on yield and quality, because total N supply was adapted to the N demand of the crops (DÜNGEVERORDNUNG 2009), even though N deficiency symptoms were sometimes visible in winter wheat plants before the N application at GS 27–32. Obviously, the winter wheat plants were able to overcome temporary N deficiency situations without negative effects on further growth and yield. Similar results were found by BOELCKE (2001), KÜCKE (2001a) and SOMMER (2000) with placed N applications.

The single broadcast application did not lead to lodging of winter wheat plants in any of the 4 years, even though no growth regulators were applied by farmers. Lodging should be particularly critical for distinct density types of wheat cultivars if the total amount of N is applied in a single dose. Nevertheless, although some winter wheat cultivars used in the field experiments tended to be density types, no lodging was visible. Obviously, modern winter wheat varieties characterized by high stem strength and reduced shoot length exhibit a decreased disposition to lodging.

No significant differences in grain crude protein were observed between treatments, except in 2010. The same results were found by KÜCKE (2001*b*). These findings are, however, in contrast to results of BOELCKE (2001), who reported lower crude protein contents after a single placed application. Consequently, BOELCKE (2001) recommended an application of N at GS 49–65 in order to obtain a higher crude protein content. In 2010, crude protein contents were exceptionally high in all treatments indicating a high N-uptake particularly during the latest stage, thus, determining protein storage. Under these conditions a late split application of N might promote protein storage as shown by the higher protein content in the 3×CAN treatment compared to the 1×CAN treatment. The high protein content of the single application of urea and UAN solution in 2010 can be explained by reduced mineralization of these fertilizers due to severe dryness in spring inducing a better N availability during protein storage.

Differences in the general crude protein level, due to year and site, might also explain the differences between independent investigations.

In contrast to the current results, slight differences between the efficiency of the N fertilizer type urea and CAN were found by CZAUDERNA (1992) and WEIMAR (2001). One might assume that N fertilization with urea causes lower crude protein when surface applied during drought and high temperatures. Under these conditions gaseous N losses may reduce the effective N amount supplied.

The differences in mean crude protein in the individual years were partly explained by weather conditions during head emergence and flowering of winter wheat. For example, the relatively high crude protein content in 2007 can be explained by above average temperatures and rainfall during these late developmental stages. However, there seems to be a negative feedback concerning grain yield and crude protein content. As mentioned above, in 2008, the year with highest grain yield (9.4 t DM/ha), crude protein was lowest

(11.9%). This might be due to a 'dilution effect' as a consequence of optimal growth conditions during tillering and stem elongation, promoting the formation of yield components. Under these conditions, endosperm low in protein is enlarged relative to the germ with high protein content. However, if the yield components 'ears/m²' and 'number of grains/ear' are reduced, probably as a result of spring drought, a high N availability during grain-filling, depending on N uptake and remobilization of N, might result in higher crude protein levels.

In wheat, the first N application is traditionally given at tillering in order to support the number of tillers/m². Nitrogen has to be applied at the beginning of tillering around GS 21–25, particularly for plant stand density types, whereas an application at GS 31 should support the number of grains/ear and diminish the reduction of ears/m² (MAIDL *et al.* 1998). In the present study, in 2007 and in 2008 no significant differences in the number of ears/m² between treatments or cultivars were detected. The reason may be a sufficient N supply in the soil during tillering. SOMMER (2000) also found no differences between a single placed N application and a split application, whereas KÜCKE (2001) reported higher numbers of ears/m² after a single placed application. In general, plants are able to balance a reduced number of ears/m². When ears/m² are reduced the number of grains/ear and the thousand grain weight are relatively higher (NIEHOFF 1978). In 2007, a higher number of grains/ear for the single broadcast application of urea and the single placed application of UAN solution were measured, although April 2007 was extremely dry. It can be assumed that plant development was reduced by drought and the late N application became effective only after rainfall at the beginning of May.

The thousand grain weight depends on the availability of assimilates, which obviously was not limited in 2008. KÜCKE (2001a) also found no significant differences between the thousand grain weights of a single placed application and a split application. The amount of assimilates is limited and thousand grain weight reduced only if drought appears during grain filling, causing the plants to mature earlier.

It might be argued that the risk of NO₃⁻-leaching during the vegetation period is increased by a single broadcast application of N (GERWING *et al.* 1979). This might be true for sandy or shallow silty soils, but it is unlikely for deep loamy soils (Beaudoin *et al.* 2005), especially under the climatic conditions of south-west Germany, where evapotranspiration is quite high during the growth period. The inorganic N after harvest accounted for c. 20 kg N/ha in

the topsoil and for 5–10 kg N/ha in the 30–60 cm layer without significant differences between the fertilization treatments, indicating that no NO_3^- -leaching occurred during the vegetation period.

The soil samples from the labelled placement bands 10 days after the application of UAN at GS 30–32 showed a concentration of 230 mg mineral N/kg soil with a proportion of 77 % NH_4^+ in 2008. According to SOMMER (2005), a more beneficial plant morphology compared to conventionally fertilized plants is an advantage of the placed application of NH_4^+ fertilizer. ZHANG & BARBER (1993) showed a linear increase in root length density and root surface within the diffusion zone of banded ammonium sulphate depending on the amount supplied. However, in the current study no visual differences between placed and conventionally fertilized plants were found. Additionally, no aggregation of roots around the placed area was visible when digging in the fertilizer bands. This might indicate that N nutrition of plants was not NH_4^+ -dominated. This assumption goes along with MENGEHARTMANN & SCHITTENHELM (2008) who found slight physiological reactions typical for NH_4^+ -nutrition during stem elongation, but no differences between NH_4^+ - and NO_3^- -fertilization at later stages of spring wheat development.

The lack of root aggregation around the placed area in the top soil can be advantageous to overcome drought compared to root aggregation in a dry topsoil. A reasonable method to tackle this problem and to maintain a high grain yield compared to broadcast application is to place N fertilizers in deeper soil layers, as was shown by JANZEN *et al.* (1990). In soils with low N mineralization potential roots will exploit this nutrient patch, since N (mainly NO_3^-) triggers root formation towards high concentrations (DREW 1975; FORDE & LORENZO 2001) and thereby enlarges root to shoot ratio (MARSCHNER 1995).

Conclusion

The current results have shown that a reduction in the number of N applications to winter wheat with a late first application can be recommended for the climatic conditions of south-west Germany on medium to heavy textured deeply developed soils. If crude protein contents are negligible, i.e. in ethanol-wheat production, a single application is sufficient.

The findings strongly call for further investigations under different climatic conditions also including other crop species. The worldwide use of split applications of N fertilizer seems to be built at least partly on obsolete assumptions developed under conditions that are no

longer valid, e.g. more flexible varieties and an overall higher level of fertilization compared to decades ago.

Most of the participating farmers have already adopted the reduction in the number of doses from three to two or even single application.

The authors thank the participating farmers for their intense cooperation and Mr. Scott Demyan for improving the English. We also thank the anonymous reviewers for valuable suggestions. The experiments were supported by the Ministry of Rural Areas and Consumer Protection of the federal state of Baden-Württemberg, Germany.

References

- ALCOZ, M. M., HONS, F. M. & HABY V.A. (1993). Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. *Agronomy Journal* 85, 1198-1203.
- AUSTIN, R. B., BINGHAM, J., BLACKWELL, R. D., EVANS, L. T., FORD, M. A., MORGAN, C. L. & TAYLOR, M. (1980). Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 94, 675-689.
- BEAUDOIN, N., SAAD, J. K., VAN LAETHEM, C., MACHET, J. M., MAUCORPS, J. & MARY, B. (2005). Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111, 292-310.
- BOELCKE, B. (2001). Effekte der N-Injektionsdüngung auf Ertrag und Qualität von Getreide und Raps in Mecklenburg-Vorpommern. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 245, 45-53.
- BUNDESSORTENAMT (2012). Beschreibende Sortenliste - Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Hannover: Bundessortenamt.
- CZAUDERNA, R. (1992). Ertragsbildung und Ertragsstruktur von Winterweizensorten unter besonderer Berücksichtigung des Stickstoffhaushaltes und der Nährstoffaneignung. PhD thesis, University of Kiel, Germany.
- DREW, M. C. (1975). Comparison of the effects of a localized supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. *New Phytologist* 75, 479-490.
- DÜNGEVERORDNUNG (2009). Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Paderborn, Germany: Verlag GmbH.
- FISCHBECK, G., DENNERT, J. & MÜLLER, R. (1990). N-Dynamik des Bodens, Ertragsbildung und Stickstoffentzug von Winterweizen bei unterschiedlicher Höhe und Verteilung der mineralischen N-Düngung. *Journal of Agronomy & Crop Science* 164, 297-311.
- FORDE, B. & LORENZO, H. (2001). The nutritional control of root development. *Plant and Soil* 232, 51-68.
- FOX, R. H., KERN, J. M. & PIEKIELEK, W. P. (1986). Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptakes. *Agronomy Journal* 78, 741-746.
- GERWING, J. R., CALDWELL, A. C. & GOODROAD, L. L. (1979). Fertilizer nitrogen distribution under irrigation between soil, plant, and aquifer. *Journal of Environmental Quality* 8, 281-284.

- HAMID, A. (1972). Efficiency of N uptake by wheat, as affected by time and rate of application, using N¹⁵-labelled ammonium sulphate and sodium nitrate. *Plant and Soil* 37, 389-394.
- HARTMAN, M. D. & NYBORG, M. (1989). Effect of early growing season moisture stress on barley utilization of broadcast-incorporated and deep-banded urea. *Canadian Journal of Soil Science* 69, 381-389.
- JANZEN, H. H., LINDWALL, C. W. & ROPPEL, C. J. (1990). Relative efficiency of point-injection and surface applications for N fertilization of winter wheat. *Canadian Journal of Soil Science* 70, 189-201.
- KANWAR, R. S., BAKER, J. L. & BAKER, D. G. (1988). Tillage and split N-fertilization effects on subsurface drainage water quality and crop yields. *Transactions of the ASAE* 31, 453-461.
- KÜCKE, M. (2001a). Biomasseproduktion und N-Effizienz von Winterweizen und Winterroggen nach N-Injektionsdüngung: Feldversuchsergebnisse 2001. *Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft* 245, 81-92.
- KÜCKE, M. (2001b). Ertrag und Kornqualität von Winterweizen und Winterroggen nach N-Injektionsdüngung: Feldversuchsergebnisse 2001, *Landbauforschung Voelkenrode, Sonderheft* 245, 69-80.
- LIU, X. J., MOSIER, A. R., HALVORSON, A. D. & ZHANG, F. S. (2006). The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from a clay loam soil. *Plant and Soil* 280, 177-188.
- MAIDL, F. X., PANSE, A., DENNERT, J., RUSER, R. & FISCHBECK, G. (1996). Effect of varied N rates and N timings on yield, N uptake and fertilizer N use efficiency of a six-row and a two-row winter barley. *European Journal of Agronomy* 5, 247-257.
- MAIDL, F. X., STICKSEL, E., RETZER, F. & FISCHBECK, G. (1998). Effect of varied N-fertilization on yield formation of winter wheat under particular consideration of mainstems and tillers. *Journal of Agronomy and Crop Science* 180, 15-22.
- MARSCHNER, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Second Edition. London: Academic Press.
- MENGE-HARTMANN, U. & SCHITTENHELM, S. (2008). Depotstabilität von lokal injiziertem Ammonium und Einfluss auf den Metabolismus von Sommerweizen. *Landbauforschung vTI Agriculture and Forestry Research* 58, 235-246.
- MÜLLER, S., ANSORGE, H. & WEIGERT, I. (1991). Einfluss der Stickstoffdüngung auf Ertrag, Ertragsstruktur und N-Verwertung von Winterweizen - Möglichkeiten und Grenzen der Bestandesführung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 154, 115-119.

- NIEHOFF, K.-H. (1978). Möglichkeiten der Kompensation witterungsbedingter Schwankungen der Ertragsstruktur einiger Weizen- und Gerstensorten durch variierte N-Ernährung. PhD thesis, University of Kiel, Germany.
- PIEPHO, H.P. (2012). A SAS macro for generating letter displays of pairwise mean comparisons. *Communications in Biometry and Crop Science* 7, 4-13.
- PIEPHO, H.-P., RICHTER, C., SPILKE, J., HARTUNG, K., KUNICK, A. & THÖLE, H. (2011). Statistical aspects of on-farm experimentation. *Crop and Pasture Science* 62, 721-735.
- SCHITTENHELM, S. & MENGE-HARTMANN, U. (2006). Yield formation and plant metabolism of spring barley in response to locally injected ammonium. *Journal of Agronomy and Crop Science* 192, 434-444.
- SOMMER, K. (2000). CULTAN-cropping system: Fundamentals, state of development and perspectives. In *Nitrogen in a Sustainable Ecosystem: From the Cell to the Plant* (Eds M. A. Martins-Loucao & S. H. Lips), pp. 361-375. Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers.
- SOMMER, K. (2005). CULTAN-Düngung, Physiologisch, ökologisch, ökonomisch optimiertes Düngungsverfahren für Ackerkulturen, Grünland, Gemüse, Zierpflanzen und Obstgehölze. Gelsenkirchen, Germany: Verlag Th. Mann.
- SOMMER, K. & SCHERER, H. W. (2009). Source/sink-relationships in plants as depending on ammonium as "CULTAN", nitrate or urea as available nitrogen fertilizers. *Acta Horticulturae* 835, 65-87.
- STICKSEL, E., MAIDL, F.-X., RETZER, F., DENNERT, J. & FISCHBECK, G. (2000). Efficiency of grain production of winter wheat as affected by N fertilisation under particular consideration of single culm sink size. *European Journal of Agronomy* 13, 287-294.
- TELLER, G. L. (1932). Non-protein nitrogen compounds in cereals and their relation to the nitrogen factor for protein in cereals and bread. *Cereal Chemistry* 9, 261-274. Cited in: LOPEZ-BELLIDO, R. J., SHEPHERD, C. E. & BARRACLOUGH <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S116103010300025X> - AFF2 P. B. (2004). Predicting post-anthesis N requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter. *European Journal of Agronomy* 20, 313-320.
- VARSHNEY, P., KANWAR, R. S., BAKER, J. L. & ANDERSON, C. E. (1993). Tillage and nitrogen management effects on nitrate-nitrogen in the soil profile. *Transactions of the ASAE* 36, 783-789.
- VDLUFA (2007). Methodenbuch Band I „Die Untersuchung von Böden“, 4. Darmstadt, Germany: VDLUFA-Verlag.
- WASSER- UND BODENATLAS BADEN-WÜRTTEMBERG (2012). Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart, Germany; Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Eds.) ISBN 3-88251-276-8.

- WEIMAR, S. (2001). Untersuchungen zur N-Düngung nach dem CULTAN-Verfahren bei Getreide, Zuckerrüben und Kartoffeln in Rheinland-Pfalz. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 245, 23- 44.
- ZADOKS, J. C., CHANG, T. T. & KONZAK, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research 14, 415-421.
- ZHANG, J. & BARBER, S. A. (1993). Corn root distribution between ammonium fertilized and unfertilized soil. Communications in Soil Science and Plant Analysis 24, 411-419.

2.2 Kapitel 2:

Simplified N fertilization strategies to winter wheat.

Part 1: Plants: Compensation capacity of modern wheat varieties

Eingereicht am 02.12.2018 beim Journal „Archives of Agronomy and Soil Science“

ISSN: 0365-0340

Schwerpunkt dieses Artikels war die Untersuchung von modernen Winterweizensorten insbesondere deren Kompensationsfähigkeit hinsichtlich der Ausprägung von Ertragskomponenten und derer Plastizität. Dazu wurden drei Winterweizensorten, die sich in der Ausprägung der Ertragskomponenten unterscheiden, geprüft. Es wurden Sorten mit einer Neigung zum Bestandichte- als auch mit einer Neigung zum Einzelährentyp ausgewählt. Dies geschah in einer randomisierten Blockanlage mit vier Wiederholungen über zwei Jahre auf einer tiefgründigen Parabraunerde. Getestet wurden mit diesen Sorten Düngeverfahren mit einer reduzierten Anzahl an N-Teilgaben bei gleichen N-Düngemenge. Im Jahre 2010 wurde zudem ein Kompensationstyp mit unterschiedlichen KAS-Düngeverfahren getestet. Diese Daten wurden ebenfalls in die Auswertung mit einbezogen.

Authors:

Thomas Makary¹, Rudolf Schulz¹, Torsten Müller¹, Carola Pekrun²

¹Institute of Crop Science: ¹Fertilization and Soil Matter Dynamics (340i), University of Hohenheim, D-70593 Stuttgart, Germany

²Institute for Applied Agricultural Research, Nuertingen-Geislingen University, 72622 Nuertingen, Germany

Corresponding author:

Thomas Makary, Institute of Crop Science, Fertilization and Soil Matter Dynamics, University of Hohenheim, 70593 Stuttgart, Germany, Phone: +49 (0) 163 6854014; E-mail: Thomas.Makary@uni-hohenheim.de

Key words: winter wheat, nitrogen, fertilization, splitting

Abstract

Winter wheat in northwest Europe is often fertilized with several CAN (Calcium Ammonium Nitrate) servings to promote tillering (BBCH 25/27), shooting (BBCH 29/31) and begin of heading (BBCH 49/51). In large farming enterprises, however, there is a tendency to simplify methods to save costs and working time. The farmers simplified fertilization, with a combination of the first and the second N dose, either as one early application (vegetation start) or as a late first application (shooting). Modern wheat varieties seem to perform well under these conditions. In order to investigate if splitting of N-fertilization is necessary a three year experiment on a silty loam in Southwest Germany was carried out. In this experiment three, two and one application of CAN were tested and additionally varied by time of application. The amount of N fertilizer applied was the same in all treatments. The tested cultivars differed in their genetic ability to develop the yield components (tillers m⁻², kernels spike⁻¹, thousand kernel mass). Late first or single N application at BBCH 29/31 did not lead to differences in yields and protein contents compared to treatments with three N-applications. If, however N fertilization was applied in one dose at BBCH 25/27, protein contents were significantly lower compared to all other treatments though yields were not affected. These findings demonstrate the compensation capacity of modern wheat varieties. No significant differences in the development of yield components were found between the cultivars. In case of low plant density, early fertilization led to higher tiller densities but without any effect on grain yields. In two years, low plant densities were compensated by higher numbers of kernels spike⁻¹, the thousand kernel mass remaining unaffected by fertilization regime. No lodging appeared although no growth regulator was given. Hence, the results show that the number of N-applications to winter wheat can be reduced under soil and climatic conditions similar to the conditions tested here. High compensation ability of modern wheat cultivars and a high stem stability allow for N-fertilization strategies with two or even one dressing.

Introduction

German farmers usually apply nitrogen fertilizer, mostly as Calcium Ammonium Nitrate (27 % N), to winter wheat (*Triticum aestivum* L.) at BBCH stage (BBCH) 25/27 (tillering), BBCH 29/31 (beginning of shooting) and at BBCH 49/51 (heading). In order to produce high protein bread wheat, some farmers postpone the third dose or perform a further N application at BBCH 59/60 (begin of flowering).

With this strategy, nitrogen demand and supply of the plants are synchronized (Kanwar et al. 1988; VARSHNEY et al. 1993). Also lodging as a result of fast internodal growth induced by uptake of excess amounts of nitrate shall be avoided. Additionally, this may be supported by spraying growth regulator (GERWING et al. 1979).

The aim of traditional N-fertilization strategies (three or four nitrogen applications) is to support the single yield components at their respective plant development stages (STICKSEL et al. 2000; GOLBA et al. 2013). In accordance with many studies, European agricultural extension services recommend split application as an important measure to avoid lodging and N losses (LÓPEZ-BELLIDO et al. 2005). With split applications, N supply and N uptake by plants shall be synchronized, resulting in an increase of N use efficiency (NUE) (ALCOZ et al. 1993; SIELING et al. 1998).

In practical farming, however, experiences show that winter wheat can also be successfully grown using one or two applications of N-fertilizer. Results of an on-farm study (4 years) indicate the ability of modern wheat varieties to develop high grain yields and protein contents even when using simplified (reduced number of N applications) N strategies (Schulz et al. 2014). In comparison to older wheat varieties modern varieties exert higher harvest indices and reduced growing lengths (Austin et al. 1980; Sinclair 1988) and therefore a reduced risk of lodging under conditions of high N-applications early in the season.

In addition, translocation of pre anthesis nitrogen is an important source for winter wheat yield formation (DUPONT and ALTENBACH 2003; BARBOTTIN et al. 2005; XU et al. 2005). Similarly, results of SADRAS (2007) demonstrate the high plasticity especially for the grain number ear⁻¹. ENGSTRÖM and BERGKVIST (2009) tested “Tarso” as early and “Kosack” as late wheat cultivars in South West Sweden. The authors found that the total amount of N is more important for the final number of ears than splitting or timing. Accordingly, MÜLLER et al. (1991) found similar results in pot experiments with the wheat cultivar “Alcedo”.

Splitting of N fertilization is also recommended for other reasons. High contents of nitrate in the soil led to a high potential for gaseous emissions (N_2O , N_2) mainly by denitrification (MOSIER et al. 1996; KAISER et al. 1998; RUSER et al. 2000; SEHY et al. 2003; PLAZA BONILLA et al. 2014). However, high denitrification rates require anaerobic conditions which to a large extent only appear under non-optimal agricultural practice with water logging, soil compaction, insufficient rotting of harvest residues and organic fertilisers.

Also, the risk for losses by nitrate leaching should be minimized when the nitrogen fertilization is split in two or more applications. However, water-holding capacity is high in medium and heavy textured soils in Central Europe and total evapotranspiration is commonly larger than precipitation during the main growing season. Leaching during this period, thus, may only appear on sandy or very shallow soils (Beaudoin et al., 2005; BRÜMMER and HORN, 2010). In general, for environmental adaption nutrient sinks and sources in plants show a higher plasticity than external sources (XINYOU et al. 2009).

In wheat around 50-95 % of the grain N at harvest comes from the remobilization of N stored in shoots before anthesis and is more important as the adsorbed amount of N during the grain filling period (external source) (PALTA and FILLERY 1995, KICHEY et al. 2007). A large part of grain N is transferred from vegetative organs (internal source), especially from leaves and stems (GUITMAN et al. 1991; BARNEIX et al. 1992; SUN et al. 1996; MAE 1997; CRITCHLEY 2001). The experiments of MARTRE et al. (2003) show that in contrast to early grain development stages the source capacity is limited until reaching the grain filling period even when the soil N content is not limiting. N fertilization strategies with an early application of high amounts of N before anthesis take these facts into consideration. A further potential advantage of these N strategies appears under dry conditions especially in South West Germany (e.g. in May-June), where nitrogen use efficiency (NUE) is low when N is applied later than BBCH 49/51 (HARTMAN and NYBORG 1989). Many regions show high temperatures during the grain filling period implying abiotic stress and constrained wheat productivity (PORTER and GAWITH 1999; YANG et al. 2002; BARNABA' s et al. 2008). Thus, in this context a concentration of the N fertilizer application at earlier plant development stages might be beneficial.

The translocation properties especially during the grain filling period of modern wheat cultivars allow simplified N-fertilization strategies.

In the German descriptive list of registered seeds, wheat cultivars are characterised by their expression of yield components. Following this classification, typical “plant density types” will reach their yield potential with a high number of spikes m^{-2} , whereas “ear types” reach their yield potential with a large number of kernels ear^{-1} . In that list, yield components (spikes m^{-2} , kernels ear^{-1} , thousand kernel mass) are characterised on a scale from 1 (very low) to 9 (very high) (BUNDESSORTENAMT 2013).

Within modern wheat cultivars, however, the number of distinct “density types” or “ear types” is low. The majority of wheat cultivars is characterised by numbers between 4 and 6 and, hence, are classified as wheat types with high compensation capacity. So, these types show not more than a tendency towards a “density” or “ear type” (BUNDESSORTENAMT 2013). N limitations during early development, e.g. tillering, which restrict the number of ear bearing stems, may be compensated by later enhanced development of other yield components, e.g. spikelets ear^{-1} .

In this study, we argue that the above mentioned reasons for split application of N fertilizers are not relevant when growing modern wheat varieties at medium to heavy textured deeply developed soils.

We hypothesize that the number of N applications can be reduced when cultivating modern winter wheat cultivars with a high compensation potential without any negative effects on grain yield and protein content.

Materials and Methods

Site and weather conditions

This study (2010-2012) was conducted at Nürtingen-Geislingen University, Research Station Tachenhausen, Germany (48°38'57" N, 09°23'04" E). The experimental site is located 360 m above sea level with an average annual temperature of 10.2 °C and an average annual precipitation of 856 mm (measured at a weather station nearby the experimental field). The soil type is classified as Luvisol with a silty loamy texture and with the following characteristics: 1.4 mg P and 1.6 mg K kg^{-1} dry soil (soil depth: 0-30 cm, extractable in calciumacetate-lactate (CAL) solution) indicating sufficient phosphorous and potassium supply, pH (CaCl_2) 6.8 (VDLUFA 2007). The experimental field did not receive farmyard manure during the last decades, and the previous crop was winter wheat. The common crop rotation consists of sugar beets, winter wheat, spring barley and oats.

Weather conditions during the experimental years

During the experimental period, some exceptional weather events occurred: Late winter 2011 (February), early spring 2011 (March-May) and November 2011 were very dry and, furthermore, December 2011 and January 2012 were relatively warm (Table 1).

Table 1: Precipitation and temperature during the three experimental years

Temperature and precipitation during the experimental years (2009-2012)								
2009			2010		2011		2012	
	(mm)	(°C)	(mm)	(°C)	(mm)	(°C)	(mm)	(°C)
January			27.0	-2.1	39.0	1.0	63.2	2.2
February			38.5	1.2	7.3	2.4	11.4	-3.1
March			26.0	4.8	26.0	6.3	17.8	7.5
April			10.5	9.9	33.7	12.1	66.9	9.1
May			120.0	12.1	32.8	15.2	48.1	15.5
June			87.2	18.3	102.1	17.8	77.4	17.9
July			129.4	21.3	143.2	16.9	87.2	18.8
August			192.4	17.8	50.4	19.6	64.4	20.3
September	19.4	16.0	65.6	13.2	68.5	16.3		
October	83.2	9.4	42.6	8.6	50.9	9.5		
November	83.8	7.3	79.0	5.8	1.0	3.7		
December	79.4	1.6	141.8	-1.1	50.6	5.3		

Experimental design and tested factors

Six N-fertilization strategies were tested (Table 2) with three wheat cultivars in three experimental years (2009-2010, 2010-2011, 2011-2012). The different wheat cultivars tested were "Akteur", in all experimental years. "JB Asano" and "Jafet" in the two last experimental years only (Table 3).

Table 2: Nitrogen fertilizer partitioning and timing of the tested treatments 2010-2012 (BBCH = growing Stage; CAN= calcium ammonium nitrate; early= first N application to BBCH stage 25/27, late= first N application to BBCH stage 29/31 * not tested in 2010)

Treatment no.	Fertilization strategies	Splitting	Application time (BBCH)		
			BBCH 25/27 tillering 2010: 18.03. 2011: 15.03. 2012: 19.03.	BBCH 29/31 shooting 2010: 12.04. 2011: 07.04. 2012: 13.04.	BBCH 49/51 heading 2010: 05.06. 2011: 18.05. 2012: 22.05.
1	No N fertilization				
2	Farmers' practice	3xCAN	3 doses	30%	40% 30%
3	Simplified N fertilization	2xCAN early*	2 doses	70%	30%
4		2xCAN late	2 doses		70% 30%
5		1xCAN early*	1 dose	100%	
6		1xCAN late	1 dose		100%

In all three years, sowing took place before the first week of October under favourable conditions, and sowing rate was always 350 kernels m⁻². As mineral N fertilizer, calcium ammonium nitrate (27% N) was applied. N fertilization was calculated by applying the German Fertilization Regulation (DÜNGEVERORDNUNG 2009).

The N supply (including N fertilizer, mineral N in the soil profile 0-90 cm at start of vegetation period and estimated N-release during vegetation) in 2010 was 200 kg ha⁻¹, and 210 kg ha⁻¹ in 2010-11 and 2012. Yield expectations of the past years were used additionally for calculating the N requirement. In 2010, two simplified strategies (2xCAN late (BBCH 29/31) and 1xCAN late) were tested in comparison to the common farmers' practice with 3 applications (Table 2). In 2011 and 2012, further simplified strategies were tested to evaluate differences between wheat varieties (Table 3).

Table 3: Tested winter wheat varieties and the characteristics according to the German descriptive variety list (rating scheme of the Bundessortenamt, 1-9, 1 = low, 9= high)

Variety	Date of admission	Number of tillers	grains/ear	thousand kernel mass	yield potential
Grade in the German descriptive variety list					
JB Asano	01.04.2008	4	5	8	8
Akteur	27.03.2003	5	5	6	5
Jafet	03.04.2008	6	3	6	5

The different N-fertilization strategies were tested with four replicates in a one-factorial fully randomized block design in the first experimental year and in a two-factorial split-plot design in the second and third experimental year. Here, the first factor “N-strategy” was represented at the main plot level, the second factor “cultivar” on the sub-plot level (plot size: 17.5 m²).

Plant protection was applied as necessary. All experiments were managed without use of any growth regulators.

Sampling, measurements and calculations

Soil samples (0-90 cm) for the analysis of the N_{min} content (NO₃-N and NH₄-N) were taken in early spring before fertilizer application and immediately after harvest. The soil samples were frozen directly after sampling. For extraction, we used 20 g defrosted soil (for defrosting the samples were removed from the -20 °C freezer to a refrigerator at +4 °C over night) and 200 ml 0.025 M CaCl₂ solution were added (VDLUFA, 2007). Double analysis was made with a Foss Tecator 5012 Analyser. For quantifying the moisture content, 50 g defrosted soil was dried for 24 h at 105 °C.

At harvest, grain and straw yields (the latter not in 2010) were determined. Plants were taken from representative areas within the plot (2011: 0.33 m²; 2012: 0.48 m²). In each year, the yield structure was analysed by counting and measuring yield components (spikes m⁻², grains ear⁻¹, thousand kernel mass). Furthermore, the N content of grain and straw at harvest was analysed (elementar, vario MAX CNS). Prior to the analysis samples were dried for 24 hours at 60°C. Protein contents were calculated multiplying N-contents with the factor 5.7 (TELLER, 1993).

Statistical analysis

For data analysis, the statistical packages SAS 9.2 (SAS Institute, 2008) and SigmaPlot ver. 11.0 (SYSTAT SOFTWARE Inc.) were used. After testing normal distribution and homogeneity of variance effects of N-strategy, cultivar, and the interaction of N-strategy and cultivar were evaluated separately for each experimental year using a two-factorial ANOVA. Significant effects of factors indicated by the F-test ($p < 0.05$) were followed by comparison of means using the Tukey-Test.

The model used for 2010 was: $y = \mu + \text{N-strategy} + \text{N-strategy} + \text{block} + e$; the model used for 2011 and 2012 was: $y = \mu + \text{N-strategy} + \text{cultivar} + \text{N-strategy} \times \text{cultivar} + \text{block} + e$. Relationship between the spike number m^{-2} and the number of kernels spike^{-1} was calculated using Person's correlation coefficient.

Results

Grain yield and protein

There was a clear difference between the unfertilized control and the five other treatments. In the control treatment not receiving any N fertilizer, the yield was <30 % compared to the fertilized plots in two out of three years (Table 4). However, no significant differences in yield were found between the different N fertilization strategies. This effect was independent of the cultivar. The yields were in a typical order of magnitude for this site. Yields were very similar throughout the three experimental years and the different wheat cultivars. Only in 2012, the grain yield of the cultivar "Akteur" was lower than the yields of the two other cultivars.

Table 4: Winter wheat grain yield (Mg DM ha⁻¹) of different N fertilization strategies and different wheat cultivars (different letters show significant differences between N fertilization for one cultivar in one year, Tukey-test, p<0.05, n.t. = not tested, SE = pooled standard error of the mean)

Treatment no.	Fertilization strategy	2010		2011		2012		
		Akteur	Akteur	JB Asano	Jafet	Akteur	JB Asano	Jafet
1	No N fertilization	3.3a	2.7a	2.9a	2.7a	1.8a	2.5a	2.6a
2	3xCAN	6.8b	6.8b	7.1b	6.6b	5.1b	6.9b	7.0b
3	2xCAN late	6.6b	6.5b	6.8b	7.1b	4.7b	6.1b	6.7b
4	2xCAN early	n.t.	6.7b	7.2b	6.6b	5.3b	6.9b	6.8b
5	1xCAN late	6.9b	6.1b	6.6b	6.6b	4.3b	6.4b	6.4b
6	1xCAN early	n.t.	6.9b	7.5b	6.8b	5.2b	6.8b	7.0b
Mean (excluding no. 1)		6.8	6.6	7.0	6.7	4.9	6.6	6.8
SE ±		0.25		0.46			0.22	

Only in a few cases grain protein contents of >140 mg g⁻¹ were achieved (Table 5). If N fertilization took place in one dose (1xCAN early) at BBCH 25/27, protein contents were significantly lower compared to all other treatments. The protein content did not differ significantly between the other fertilization strategies. Only by tendency, application in two doses with the first one at BBCH 25/27 (2xCAN early) led to lowest protein contents in five out of six cases.

Table 5: Protein content (mg g⁻¹) of different N fertilization strategies and different wheat cultivars (different letters show significant differences between N fertilization for one cultivar in one year, Tukey-test $p < 0.05$, n.t. = not tested, SE = pooled standard error of the mean)

Treatment no.	Fertilization strategy	2010		2011		2012		
		Akteur	Akteur	JB Asano	Jafet	Akteur	JB Asano	Jafet
1	No N fertilization	94a	89a	86a	93a	113a	95a	102a
2	3xCAN	119b	130bc	123c	129c	148c	135c	139bc
3	2xCAN late	122b	140c	126c	134c	148c	130bc	143c
4	2xCAN early	n.t.	128bc	122c	126bc	139bc	131bc	137bc
5	1xCAN late	115b	132c	122c	129c	143bc	133c	133bc
6	1xCAN early	n.t.	116b	108b	113b	130b	115b	124b
Mean (excluding no. 1)		119	129	120	126	142	129	135
SE \pm		2.85		2.49			2.92	

Yield components

Spike density

In general, spike density in 2011 was lower than in 2012. In all three years, significant differences between the fertilized treatments were not found. There was a tendency, of higher numbers of spikes m⁻² under strategies with an early fertilization date at BBCH 25/27 (1xCAN early, 2xCAN early, 3xCAN) was visible by Akteur and JB Asano in 2011, and by Akteur and Jafet in 2012 (Table 6).

Table 6: Number of spikes m⁻² of different N fertilization strategies and different wheat cultivars (different letters show significant differences between N fertilization for one cultivar in one year, Tukey-test $p < 0.05$, n.t. = not tested, SE = pooled standard error of the mean)

Treatment no.	Fertilization strategy	2010		2011		2012		
		Akteur	Akteur	JB Asano	Jafet	Akteur	JB Asano	Jafet
1	No nitrogen	275a	248a	338a	302a	340a	358a	428a
2	3xCAN	412b	480ab	400a	427a	558b	589b	685b
3	2xCAN late	427b	392ab	380a	509a	509ab	570b	569ab
4	2xCAN early	n.t.	555b	489a	470a	593b	570b	669b
5	1xCAN late	464b	429ab	407a	431a	531ab	625b	659b
6	1xCAN early	n.t.	610b	475a	430a	582b	580b	741b
Mean (excluding no. 1)		434	493	430	453	554	587	665
SE \pm		20.13		46.28			36.74	

Number of kernels spike⁻¹

In the analysis of the kernels spike⁻¹, significant differences were not found between any of the fertilized treatments. In 2012, significant differences in the number of kernels spike⁻¹ were found between the fertilized treatments and the unfertilized control treatment (Table 7).

Table 7: Number of kernels spike⁻¹ of different N fertilization strategies and different wheat cultivars (different letters show significant differences between N fertilization for one cultivar in one year, Tukey-test $p < 0.05$, n.t. = not tested, SE = pooled standard error of the mean)

Treatment no.	Fertilization strategy	2010		2011		2012		
		Akteur	Akteur	JB Asano	Jafet	Akteur	JB Asano	Jafet
1	No nitrogen	27.3a	22.9a	17.5a	19.9a	15.1a	19.3a	15.9a
2	3xCAN	34.9a	33.2a	35.8ab	33.5a	27.9b	31.1b	27.3b
3	2xCAN late	34.3a	37.6a	38.6b	25.3a	27.7b	31.0b	33.1b
4	2xCAN early	n.t.	25.6a	28.2ab	28.2a	28.6b	31.3b	27.2b
5	1xCAN late	31.9a	32.6a	33.2ab	35.9a	24.7b	30.8b	25.7b
6	1xCAN early	n.t.	26.1a	34.7ab	33.0a	26.3b	32.9b	26.7b
Mean (excluding no. 1)		33.7	31.0	34.1	31.2	27.0	31.4	28.0
SE±		2.73		5.13		1.56		

Thousand kernel mass

In 2012 thousand kernel mass (TKM) was approximately 20 g lower than 2011 (Table 8). In all years and for all varieties, the unfertilized control showed lower TKM than the fertilized treatments. There were no significant differences between the fertilized treatments in 2010 and 2012. Only in 2011, 1xCAN early showed significantly lower TKMs than the other fertilized treatments (Table 8).

Table 8: Thousand kernel mass (g) of different N fertilization strategies and different wheat cultivars (different letters show significant differences between N fertilization for one cultivar in one year, Tukey-test $p < 0.05$, n.t. = not tested, SE = pooled standard error of the mean)

Treatment no.	Fertilization strategy	2010		2011		2012		
		Akteur	Akteur	JB Asano	Jafet	Akteur	JB Asano	Jafet
1	No N fertilization	42.5a	48.2a	54.1ab	51.0a	15.1a	19.3a	15.9a
2	3xCAN	44.4a	51.4ab	56.6b	56.4b	28.0b	31.1b	27.3b
3	2xCAN late	43.5a	53.2b	56.5b	57.2b	27.7b	31.0b	33.1b
4	2xCAN early	n.t.	51.6ab	57.1b	50.9a	28.6b	31.3b	27.2b
5	1xCAN late	43.1a	51.6ab	54.2ab	53.4ab	24.7b	30.8b	25.7b
6	1xCAN early	n.t.	49.0a	52.3a	51.0a	26.3b	32.8b	26.7b
Mean (excluding no. 1)		43.7	51.4	55.7	53.8	27.1	31.4	28.0
SE ±		0.56		0.68		1.7		

Correlation between kernel number and spike number

Although significant differences between the fertilized variants for kernel number spike⁻¹ and spike number m⁻² were rare or not existing, strong negative correlations were found between kernel number spike⁻¹ and spike number m⁻² for Akteur in 2010 and for all tested wheat cultivars in 2011 (Fig. 1-7). In 2012, the variability of spikes m⁻² was relatively small, a correlation between kernel number spike⁻¹, and spike number m⁻² was not found.

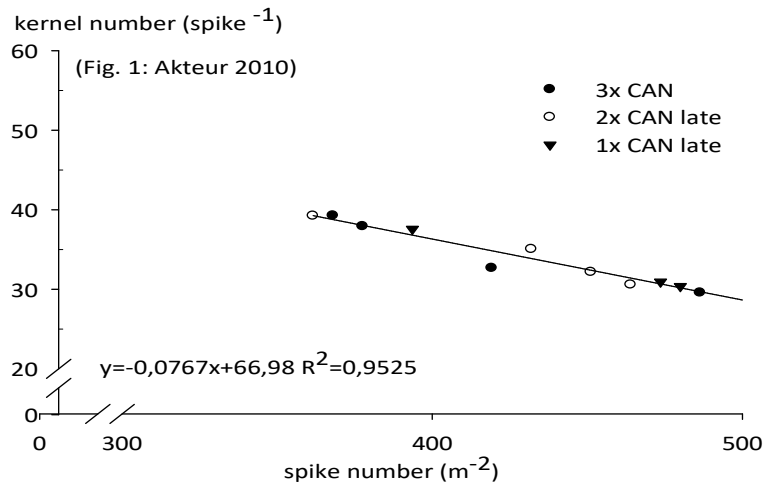


Fig. 1: Number of kernels spike⁻¹ in relation to number of spikes m⁻² of the tested wheat cultivar Akteur in the year 2010

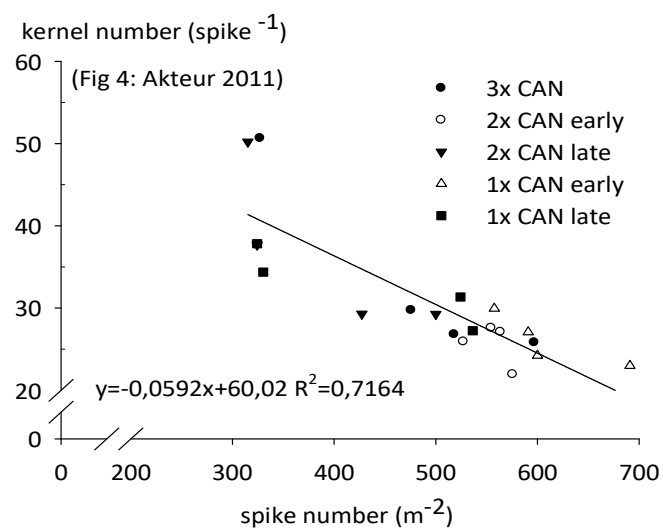
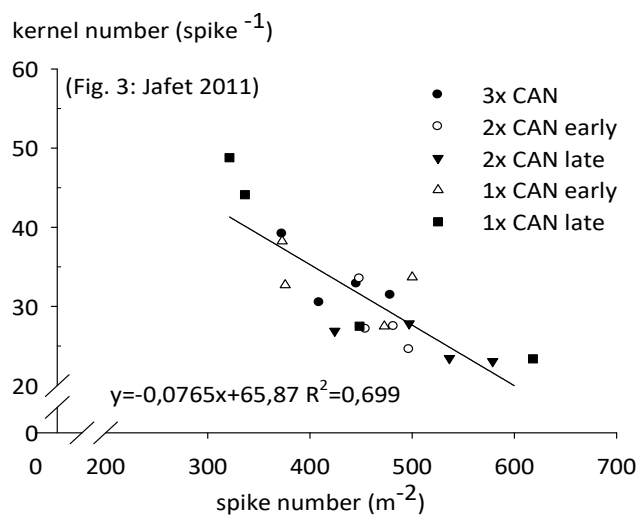
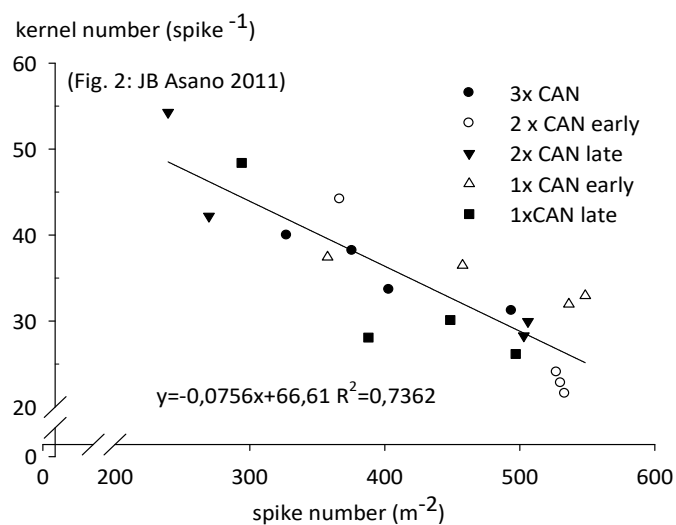


Fig. 2-4: Number of kernels spike⁻¹ in relation to number of spikes m⁻² of all tested wheat cultivars (JB Asano, Jafet, Akteur) in the year 2011

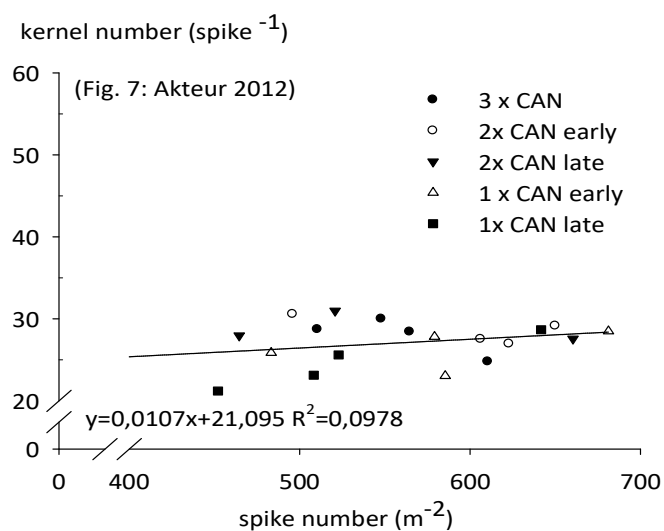
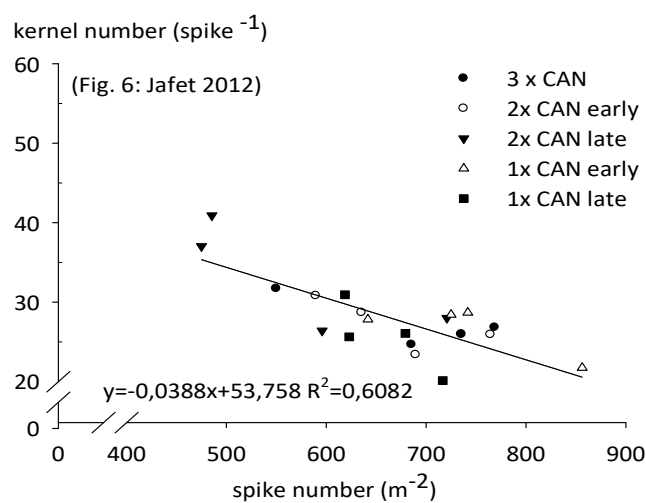
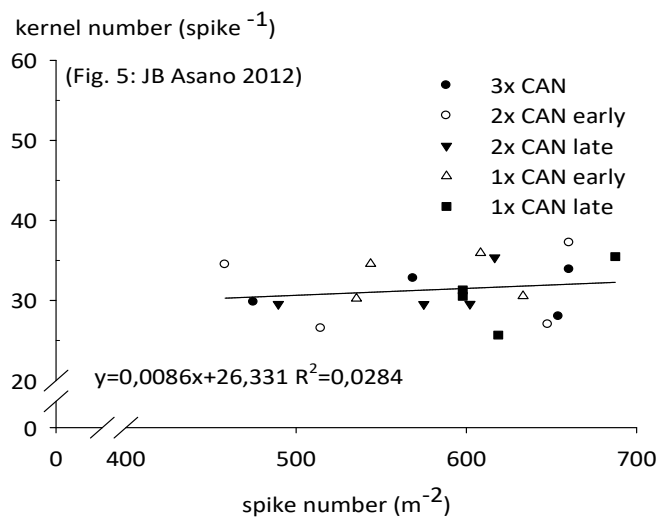


Fig. 5-7: Number of kernels spike⁻¹ in relation to number of spikes m⁻² of all tested wheat cultivars (JB Asano, Jafet, Akteur) in the year 2012

Discussion

It seems that the properties of the modern wheat varieties, especially the high harvest index (short stems) allow simplified N strategies with high nitrogen rates at BBCH stages 25/27 or 29/31. In addition, the reduced lodging risk of modern wheat cultivars seems to be crucial to produce high yields in the systems investigated here. However, lodging has not been observed in this study, although no growth regulator was applied. N fertilization before anthesis increased the N contents in plants and hence N supply of kernels after anthesis (AUSTIN and Jones 1975; AUSTIN et al. 1977; PAPA KOSTA and GAGIANAS 1991). This effect can be one reason that no yield losses occurred in our experiments when the first N serving at BBCH 25/27 and the last N serving at BBCH 49/51 were omitted.

In addition, the protein content was not significantly lower when N-fertilization omitting an application at BBCH 49/51. This fact was observed only when the single N dose was applied late at BBCH 29/31. If the single N dose was applied early significantly lower protein contents were found in comparison to 3x CAN. In compliance with the results of DALLING, et al. (1975); AUSTIN et al. (1977), HEITHOLT et al. (1990), DUPONT and ALTENBACH (2003) our results indicate that nitrogen translocation from source to sink is more important than root N uptake during kernel filling.

Reports about the influence of fertilization strategies on the development of yield components and their subsequent influence on final yields differ very much. In contrast to our own results, split N fertilization supported the number of tillers m^{-2} and increased yield in older investigations (ALCOZ et al. 1993; HAMID 1972; GOODING and DAVIES 1997). Maidl et al. (1998) found that a pronounced early fertilization resulted in excessive tillering and reduction processes during ear formation. In 2011, a large number of tillers was assessed also in our study. However, the high number of tillers did not have any impact on grain yield. Lower ear densities were compensated by a higher number of kernels spike^{-1} in all tested wheat varieties.

In 2012, early fertilizations at BBCH stage 25/27 did not lead to higher numbers of tillers. In general, in 2012 higher numbers of tillers m^{-2} were found than in 2011. Our results suggest that the compensation capacity of the investigated winter wheat cultivars is considerable allowing a single of fertilization strategies leading to distinct compositions of yield components but to same yields. Accordingly, winter wheat may be able to overcome

temporary N deficiency situations without negative effects on further growth and yield (Schulz et al. 2014).

The lack of influence of N splitting strategies on winter wheat yields was also reported by SCHULZ et al. (2014), but, from on farm experiments. Most of these farmers' fields were regularly fertilised with organic fertilizer. Hence, it was speculated that the high mineralisation potential at these sites might have compensated for N deficiency during the later growing season in treatments with reduced numbers of N applications.

In our study, grain yields of the control plot (no N fertilization) represented only 30 % of the yield achieved by the fertilized plots, indicating very limited N-mineralization of the soil. The experimental field had not received organic fertilization during the preceding decades. It can be assumed, that our study site had a low N-mineralisation potential and thus a limited potential to compensate for sub-optimal mineral N fertilization during grain filling. Even under these conditions, simplified N fertilization strategies with a reduced number of applications was applied successfully.

The amount of N fertilizer applied in this experiment was calculated according to the German Fertilization Regulation (DÜNGEVERORDNUNG 2010) assuming an average grain yield achieved at the site the previous years. According to Müller et al. (1991), sufficient N supply is more important for yield and protein content than timing or splitting of N fertilizers. Under production systems with a reduced N supply, however, the effects of timing and splitting might be more important.

In early growing stages, up to BBCH 25, N uptake by plants is low and the risk of nitrate leaching and runoff is quite high especially on sandy and shallow soils. Furthermore, NUE was observed to be lower in comparison to fertilization dates at shooting stage (BBCH 29/31 (BLANKENAU et al. 2002). In years with low spring temperatures, the risk of nitrate leaching might be high because of low plant N uptake rates. The combination of the first and second N serving at a late application time as done here (treatments 4 and 6) may reduce the risk for N losses via leaching.

According to previous studies, the effect of weather conditions on N uptake was more important than splitting or timing of N (FISCHBECK et al. 1990; ALCOZ et al. 1993; MAIDL et al. 1996). The large difference in thousand kernel mass of more than 15 g between 2011 and 2012 showed this effect very clearly. In comparison to the past years the winter 2009/10 and 2010/11 showed normal weather conditions with typical vegetation breaks (December 2011

– February 2012). In the spring a negative correlation between spikes m^{-2} and kernels spike^{-1} was found. In 2012, this correlation was not found. The warm winter with good growing conditions 2011/12 led to a high tiller density in early spring 2012. As a consequence, the N fertilization strategy did not have any effect on the number of spikes m^{-2} in 2012. The higher number of spikes m^{-2} in 2012, compared to 2011, did not lead to a higher grain yield. In 2011, weather conditions (precipitation) during the grain filling period (June) were ideal for the formation of high thousand kernel masses. The development of this yield component, stimulated by the weather conditions, compensated for low plant densities and led to the same or even higher yields than in 2012. The protein content was strongly influenced by the weather conditions in each year, too. Between 2011 and 2012, we found approximately 1 % difference in the protein content. Excluding the strategy 1xCAN early, differences between the farmers' common practice and the simplified strategies did not exist. In the whole context, the results of our experiments confirm our hypotheses. When using modern wheat varieties simplified N fertilization strategies enable to produce high yields and protein contents. Especially late first N servings (BBCH 29/31) with and without N serving to BBCH 49/51 seems to be successful. The results show that the most yield determining factor for wheat production are the weather conditions followed by the compensation capacity of modern wheat varieties, the soil N pool and at last the splitting of N.

Conclusions

Under the conditions investigated here, there is no need for early N fertilization in order to achieve a sufficient number of spikes m^{-2} and high grain yields. In years with low plant density, early nitrogen doses may increase the tiller density, but this increased tiller density does not necessarily lead to higher grain yields. The yield components spikes m^{-2} and kernels ear^{-1} show high adaptability and compensate each other. High N supply at early stages (BBCH 25/27) led to high plant densities and low kernel masses ear^{-1} , whereas fertilization at BBCH 29/31 supported the individual ear formation.

Especially the adaptability of the translocation demonstrate the high compensation capacity. This compensation capacity in combination with high harvest indices of modern wheat cultivars makes it possible to combine the early fertilization date (BBCH 25/27) and the second dose (BBCH 29/31) to one single application at shooting stage (BBCH 29/31). This may simplify winter wheat production at sites comparable with our experimental sites.

With respect to nitrate leaching and gaseous emissions further investigations, particularly for other site conditions e.g. sandy and shallow soils are necessary.

Acknowledgements

We thank the technical staff of the Research Station Mrs. Sabine Hubert, Mr. Manfred Wüstholtz, Mr. Bjoern Stauss, Mr. Stefan Pflaum. We would also like to thank all employees of the Research Station Ihinger Hof and the Institute of Crop Science of the University of Hohenheim, particularly the group of Hans-Peter Piepho.

We thank the Ministry of Rural Areas and Consumer Protection of the Federal State of Baden-Württemberg, Germany for financial support.

References

- ALCOZ M. M., HONS F. M. HABY V.A. (1993)
Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. *Agronomy Journal* 85 (6), 1198-1203.
- AUSTIN R. B, Ford M.A, EDRICH J. A, BLACKWELL R. D. (1977)
The nitrogen economy of winter wheat. *Journal of Agricultural Science* 88, 159-167.
- AUSTIN, R. B., BINGHAM, J., BLACKWELL, R. D., EVANS, L. T., FORD, M. A., MORGAN, C. L. and TAYLOR, M. (1980)
Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 94, 675-689.
- BARBOTTIN, A., Lecomte, C., BOUCHARD, C., JEUFFROY, M. H. (2005)
Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: genotypic and environment effects. *Crop Sci.* 45, 1141-1150.
- BARNABÁS, B., JÄGER, K., FEHÉR, A., (2008)
The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ.* 31, 11–38.
- BARNEIX, A. J., R. A. ARNOZIS, and M. R. GUITMAN, (1992)
The regulation of nitrogen accumulation in the grain of wheat plants (*Triticum aestivum* L.). *Physiol. Plant.* 86, 609-615.
- BEAUDOIN, N., SAAD, J. K., Van LAETHEM, C., MACHET, J. M., MAUCORPS, J. and MARY, B. (2005)
Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 111, 292–310.
- BLANKENAU, K., OLFS, H.-W. and KUHLMANN, H., (2002)
Strategies to Improve the Use Efficiency of Mineral Fertilizer Nitrogen Applied to Winter Wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science* 188, 146-154.
- BRÜMMER and HORN (2010)
Böden als Pflanzenstandorte in: Scheffer, F., Schachtschabel, P., (Eds.) *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 409-412.
- BUNDESSORTENAMT (2013)
Beschreibende Sortenliste - Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Bundessortenamt, Hannover, 288 pp.
- COX, M.C., QUALSET, C.O., RAINS, D.W., (1985a)
Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. I. Dry matter and nitrogen accumulation. *Crop Science*, 25, 430-435.

- CRITCHLEY, C. S. (2001)
A physiological explanation for the canopy nitrogen requirement of winter wheat.
PhD Thesis. University of Nottingham, UK, 257 pp.
- COX, M.C., QUALSET, C.O., RAINS, D.W., (1985b)
Genetic variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat. II. Nitrogen assimilation in relation to grain yield and protein. *Crop Science*, 25, 435-440.
- DALLING M. J, HALLORAN G. M, WILSON J. H., (1975)
The relation between nitrate reductase and grain nitrogen production in wheat.
Australian Journal of Agricultural Research 26, 1-10.
- DALLING, M.J. (1985)
The physiological basis of nitrogen redistribution during grain filling in cereals. In: Harper, J.E., Schrader, L.E., Howell, R.W. (Eds.), *Exploration of Physiological and Genetic Variability to Enhance Crop Productivity*. American Society of Plant Physiologists, Rockville, MD, pp. 55-71.
- DUPONT, F. M., ALTENBACH, S. B. (2003)
Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *J. Cereal Sci.* 38, 133-146.
- DÜNGEVERORDNUNG (2009)
Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen. Paderborn, Germany: Verlag GmbH.
- ENGSTRÖM, L., BERGVIST, G., (2009)
Effects of three N strategies on tillering and yield of low shoot density winter wheat. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B, Soil and Plant Science*, 59, 536-543.
- FISCHBECK, G., DENNERT, J. und MÜLLER, R. (1990)
N-Dynamik des Bodens, Ertragsbildung und Stickstoffentzug von Winterweizen bei unterschiedlicher Höhe und Verteilung der mineralischen N-Düngung. *Journal of Agronomy and Crop Science* 164, 297-311.
- GERWING, J. R., CALDWELL, A.C. and GODDROAD, L. L. (1979)
Fertilizer nitrogen distribution under irrigation between soil, plant, and aquifer. *Journal of Environmental Quality* 8, 281-284.
- GOLBA, J., ROZBICKI, J., GOZDOWSKI, D., Sas, D., MAŁDZY, W., PIECHOCIŃSKI, M., KURZYŃSKA, L., STUDNICKI, M., DEREJKO, A., (2013)
Adjusting yield components under different levels of N applications in winter wheat. *International Journal of Plant Production* 7 (1), 139-150.
- GOODING, M.J., and DAVIES, P.D. (1997)
Wheat Production and Utilization, Systems, Quality and the Environment, CAB International, Wallingford, UK, p. 335.

- GUITMAN, M. R., R. A. ARNOZIS, and A. J. BARNEIX, (1991)
Effect of source-sink relations and nitrogen nutrition on senescence and N remobilization in the flag leaf of wheat. *Physiol. Plant.* 82, 278-284.
- HAMID, A., (1972)
Efficiency of N uptake by wheat as affected by time and rate of application, using N-labelled ammonium sulphate and sodium nitrate. *Plant and Soil* 37, 389-394.
- HARTMAN, M. D. and NYBORG, M. (1989)
Effect of early growing season moisture stress on barley utilization of broadcast-incorporated and deep-banded urea. *Canadian Journal of Soil Science* 69, 381-389.
- Heitholt, J.J., CROY, L.I., MANESS, N.O., NGUYEN, H.T., (1990)
Nitrogen partitioning in genotypes of winter wheat differing in kernel N concentration. *Field Crops Research* 23, 133-144.
- KAISER, E.-A., KOHRS, K., KUECKE, M., Schnug, E., HEINEMEYER, O., MUNCH J. C., (1998)
Nitrous oxide release from arable soil: Importance of n fertilization, crops and temporal variation. *Soil Biology Biochemistry*. Vol. 30, No. 12, 1553-1563.
- Kanwar, R. S., Baker, J. L. and Baker, D. G. (1988)
Tillage and split N-fertilization effects on subsurface drainage water quality and crop yields. *Transactions of the ASAE* 31 (2), 453-461.
- KARAMANOS, A.J., ECONOMOU, G., PAPASTAVROU, A., TRAVLOS, I.S. (2012)
Screening of Greek wheat landraces for their yield responses under arid conditions *International Journal of Plant Production* 6 (2), 225-238.
- KICHEY, T., HIREL, B., HEUMEZ, E., DUBOIS, F., Le GOUIS, J., et al (2007)
In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlate with agronomic traits and nitrogen physiological markers. *Field Crop. Res.* 102, 22-32.
- LÓPEZ-BELLIDO , L., LOPEZ-BELLIDO, R.,J. REDONDO, R., (2005)
Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crop Research* 94, 86-97.
- MAIDL, F. X., STICKSEL, E., RETZER, F. and FISCHBECK, G. (1998)
Effect of varied N-fertilization on yield formation of winter wheat under particular consideration of mainstems and tillers. *Journal of Agronomy and Crop Science* 180, 15-22.
- MAIDL, F. X., PANSE, A., DENNERT, J., RUSER, R. and FISCHBECK, G. (1996)
Effect of varied N rates and N timings on yield, N uptake and fertilizer N use efficiency of a six-row and a two-row winter barley. *European Journal of Agronomy* 5, 247-257.

MAE, T., (1997)

Physiological nitrogen efficiency in rice: nitrogen utilization, photosynthesis, and yield potential. *Plant Soil* 196, 201-210.

MARTRE, P., PORTER, J. R., JAMIESON, P.D., TRIBOI, E., (2003)

Modeling Grain Nitrogen Accumulation and Protein Composition to Understand the Sink/Source Regulations of Nitrogen Remobilization for Wheat, *Plant Physiology*, Volume 3, 1559-1567.

MORGAN, C. L. and TAYLOR, M. (1980)

Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 94, 675-689.

MOSIER, A.R., DUXBURY, J.M., FRENEY, J.R., HEINEMEYER O., MINAMI, K. (1996)

Nitrous oxide emissions from agricultural fields: Assessment, measurement and mitigation. *Plant and Soil* 181: 95-108.

MÜLLER, S., ANSORGE, H. und WEIGERT, I. (1991)

Einfluss der Stickstoffdüngung auf Ertrag, Ertragsstruktur und N-Verwertung von Winterweizen - Möglichkeiten und Grenzen der Bestandesführung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 154 (2), 115-119.

PALTA, J.A., and FILLERY, I.R.P (1995)

N-application enhances remobilization and reduces losses of pre-anthesis N in wheat grown on a duplex soil. *Aust. J. Agric. Res.* 46, 519-531.

PAPAKOSTA, D., and A. A. GAGIANAS, (1991)

Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling. *Agronomy Journal* 83, 864-870.

PELTONEN-SAINIO, P., KANGAS, A., SALO, Y., JAUHIAINEN, L., (2007)

Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination, Evidence based on 30 years of multi-location trials. *Field Crops Research* 100, 179–188.

PORTER, J.R., GAWITH, M., (1999)

Temperature and the growth and development of wheat: a review. *European journal of Agronomy* 10, 23-36.

PLAZA BONILLA, D., ÁLVARO-FUENTES, J., ARRÚE, J.L., CANTERO-MARTÍNEZ, C., (2014)

Tillage and nitrogen fertilization effects on nitrous oxide yield-scaled emissions in a rainfed mediterranean area. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 189, 43-52.

RUSER, R., FLESSA, H., SCHILLING, R., BEESE, F., MUNCH, J.-C., (2000)

Effect of crop-specific field management and N fertilization on N₂O emissions from a fine-loamy soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 59, 177–191

- SINCLAIR, T. R., (1998)
Historical Changes in Harvest Index and Crop Nitrogen Accumulation
Crop Science Volume 38, Number 3, 638-643
- SAS INSTITUTE Inc., (2008)
SAS users guide: The mixed procedure. SAS Institute Inc Cary, NC, USA
- SADRAS, V.O., (2007)
Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and
number in crops. Field Crops Research 100, 125-138.
- SYSTAT SOFTWARE Inc, SigmaPlot ver. 11.0 San Jose, CA, USA
- SCHULZ, R., MAKARY, T., HUBERT, S., HARTUNG, K., GRUBER, S., DONATH, S., DÖHLER, J., WEIß, K.,
EHRHART, E., CLAUPEIN, W., PIEPHO, H-P., PEKRUN, C., MÜLLER, T. (2014)
Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on
Luvisols in South-West Germany The Journal of Agricultural Science 153, 575-587.
- SEHY, U., RUSER, R., MUNCH, J-C. (2003)
Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site-specific fertilization,
and soil conditions. Agriculture, Ecosystems and Environment 99, 97-111.
- SELING, K., SCHRÖDER, H., FINCK, M., HANUS, H., (1998)
Yield, N uptake, and apparent N-use efficiency of winter wheat and winter barley
grown in different cropping systems: Journal of Agricultural Science, Cambridge, 131,
375-387.
- STICKSEL, E., MAIDL, F.-X., RETZER, F., DENNERT, J., FISCHBECK, G., (2000)
Efficiency of grain production of winter wheat as affected by N fertilization under
particular consideration of single culm sink size. European Journal of Agronomy 13,
287-294.
- SUN, Z. Y., HAN, B. W., LIU, S. L., WANG, H. F., GAO, R. F., (1996)
Absorption and redistribution of nitrogen during grain-filling period of wheat and
their regulation by 6-benzylaminopurine. Acta Phytophysiol. Sin. 22, 258-264.
- TELLER, G. L. (1932)
Non-protein nitrogen compound in cereals and their relation to the nitrogen factor
for protein in cereals and bread. Cereal Chemistry 9: 261–274. Cited in: Lopez-Bellido,
R. J., Shehepherd, C. E. and Barraclough P. B. (2004). Predicting post-anthesis N
requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter European Journal of
Agronomy 20, 313-320.
- VARSHNEY, P., KANWAR, R. S., BAKER, J. L. and ANDERSON, C. E. (1993)
Tillage and nitrogen management effects on nitrate-nitrogen in the soil profile.
Transactions of the ASAE 36(3), 783-789.

VDLUFA (2007)

Methodenbuch Band I „Die Untersuchung von Böden“, 4. Auflage, VDLUFA-Verlag, Darmstadt.

XU, Z.Z., YU, Z.W., WANG, D., ZHANG, Y.L., (2005),

Nitrogen Accumulation and Translocation for Winter Wheat under Different Irrigation Regimes, *Journal of Agronomy & Crop Science* 191, 439-449.

XINYOU Y., GUO, W., SPIERTZ, J. H., (2009)

A quantitative approach to characterize sink–source relationships during grain filling in contrasting wheat genotypes, *Field Crops Research* 114 (2009) 119-126

YANG, J., SEARS, R.G., GILL, B.S., PAULSEN, G.M., (2002)

Genotypic differences in utilization of assimilate sources during maturation of wheat under chronic heat and heat shock stresses. *Euphytica* 125, 179-188.

2.3 Kapitel 3:

Simplified N fertilization strategies to winter wheat. Part 2, Soils: N-mineralization potential affected by long-term cattle manure application

Eingereicht am 02.12.2018 beim Journal „Archives of Agronomy and Soil Science“

ISSN: 0365-0340

Der dritte Artikel dieser Arbeit befasst sich mit dem Einfluss des Standorts und dessen Bewirtschaftung. Dafür wurde ein Versuch auf zwei klimatisch gleichen Standorten (500m Distanz) angelegt. Die Standorte unterschieden sich hinsichtlich des N-Nachlieferungspotentials, da eine Fläche langjährig mit Wirtschaftsdüngern versorgt wurde und die andere nicht. Auf beiden Standorten war eine Parabraunerde vorzufinden. Detailliert wurde bei Auslassen von KAS-Düngegaben das Potential der Standorte hinsichtlich einer ausreichenden N-Versorgung von Winterweizen untersucht. Auch dies wurde über zwei Vegetationsperioden mit einer Sorte und fünf Wiederholungen durchgeführt. Zur besseren Bemessung des N-Nachlieferungspotentials wurde ebenfalls eine Variante ohne N-Düngung sowie eine Bracheparzelle angelegt.

Authors:

Thomas Makary¹, Rudolf Schulz¹, Carola Pekrun², Torsten Müller¹

¹Institute of Crop Science: ¹Fertilization and Soil Matter Dynamics (340i), University of Hohenheim, D-70593 Stuttgart, Germany

²Institute for Applied Agricultural Research, Nuertingen-Geislingen University, 72622 Nuertingen, Germany

Corresponding author:

Thomas Makary, Institute of Crop Science, Fertilization and Soil Matter Dynamics, University of Hohenheim, 70593 Stuttgart, Germany, Phone: +49 (0) 163 6854014; E-mail: Thomas.Makary@uni-hohenheim.de

Key words: split application, mineralization, wheat, nitrogen

Abstract

In Germany, winter wheat usually is fertilized with multiple N servings for balancing the N demand of the crop and the N supply by the soil throughout the whole crop rotation.

The high soil N mineralization potential especially in farms with regular manure application may often be considerable. It seems that a subdivision of the N fertilization on such fields is not always needed. In 2011 and 2012 two identical field experiments on loess soils, with contrasting cattle manure fertilizations in the past, were conducted to investigate the necessity of N splitting and its timing.

In both years, simplified strategies with one or two N servings omitting early N servings in BBCH stage 25/27 did not show lower yields than the common practice with three servings of Calcium-Ammonium-Nitrate given at BBCH 25/27, 29/31 and 49/51. We also found in both experiments in 2011 that a single first late application at BBCH stage 29/31 was sufficient to produce high crude protein contents. In 2012, however, the results of both experiments showed that additional N servings at BBCH stage 49/51 slightly increased crude protein content. The results demonstrate the limited potential of splitting of the nitrogen servings and the impact of the field conditions. The experiments represent the differences between systems with and without long-term manure application. Nonetheless, the higher mineralization potential of the site with long-term manure fertilization did not result in enhanced plant growth and thus higher yields. On both soils it seems that when the N fertilization level is sufficient a splitted application of nitrogen is not needed.

Introduction

Long-term manure application, especially at farms with high livestock density, increases the amount of total N in the soil (CARPENTER et al. 1998; HAO et al. 2003; HABTESELASSI et al. 2006; HJORTH et al. 2010). Also the risk for nitrogen losses by denitrification after mineralization and nitrification (ROCHETTE et al. 2000; DAMBREVILLE et al. 2006), leaching (NO_3^-) (Paul and ZEBARTH 1997; BECKWITH et al. 1998; HAROLD et al. 2006) and ammonia losses increasing with a continuous application of manure (WEBB et al. 2004).

Nevertheless, many studies indicate the positive effects of organic fertilizers on the soil (e.g. soil structure, water holding capacity, microbial activity, enzyme activity) (KANDELER et al. 1999a; KANDELER et al. 1999b; MARSCHNER et al. 2003; KIRCHMANN et al. 2004; BITTMANN et al. 2005). Long-term manure application increased the organic carbon and potentially available N contents (MALLORY and GRIFFIN 2007). Also differences in the N-availability of different manures (cattle, pig, poultry) are reported (SIELING et al. 2014). Especially, differences in the nitrogen fertilizer replacement value according to the manuring histories are not sufficient considered (SCHRÖDER et al. 2007). Field experiments in regions with long term manure application in comparison with pure cash crop regions often exhibit high yields in the unfertilized control plots, demonstrating the high N mineralization potential of the soil. Such local differences in the soil N pools require determined and synchronized fertilization strategies taking the N mineralization potential into account (CAMPBELL et al. 1993; MAHLER et al. 1994; STOCKDALE et al. 1997; RECOUS and MACHET 1999; LÓPEZ-BELLIDO et al. 2000).

Currently in Germany, the fertilization system is based on a nutrient supply calculation. For this supply calculation, farmers determine the N_{\min} content in the soil at the beginning of the growing period and take potential mineralization during crop growth into account.

Most farmers in Germany base their winter wheat production on an N fertilization system with three to four applications of Calcium-Ammonium-Nitrate (CAN). The first application is mostly applied at the beginning of the growing season (BBCH stage 25/27). The second application is applied shortly before the shooting stage (BBCH stage 29/31) and the last before the heading stage (BBCH 49/51). In some cases, particular in case higher protein contents of the grain are needed, an additional N serving is given in BBCH 59/61.

This fertilization strategy aims to synchronize the N supply with the N uptake by plants (LADHA et al. 2005; LÓPEZ-BELLIDO et al. 2012). The properties of manure (e.g. mineralization dynamics) leads often to a not sufficient consideration in the nitrogen supply calculation.

Especially in regions with high livestock density, however, the organic soil N pool and its mineralization potential are not sufficiently considered during the different stages of the vegetation period.

A number of On-farm experiments did not show significant differences between the regular management of split N application and simplified strategies with one or two applications (Schulz et al. 2014). These experiments were based on data from more than 30 farms. Most of these farms were livestock farms with a long-term history using manure or liquid manure.

In this study, we conducted further experiments in order to elucidate the implication of fertilizer history. The experiments are based on the following hypotheses:

1. Soils from fields with long-term manure application and a resulting high N mineralization potential contribute to a higher extent to the N supply of winter wheat than fields without long-term manure application.
2. At these soils, the high mineralization potential compensates for an omitted early N-serving at BBCH 25/27
3. N-servings at BBCH 49/51 are not needed to produce winter wheat with high protein contents and
4. the number of N-servings can thus be reduced without any yield losses or reductions in N-protein content

Materials and Methods

Site and weather conditions

For testing these hypotheses, two field experiments were conducted each year during 2011 and 2012 at comparable plots. These experiments were performed at the University of Hohenheim (Research Station Ihinger Hof). Basic characteristics of the experimental sites, which were located about 500 m apart from each other, were similar. The main differences between the sites were the long-term manure application and its influence on soil chemical characteristics (Table 1)

Table 1: Climate conditions, field characteristics and management practice of the 2 experiments at the Research station Ihinger Hof of the University of Hohenheim. DM = dry matter.

	Experiment 1	Experiment 2
Altitude (m)	450-508	
Temperature (°C) 1991-2010	8.9	
Precipitation (mm) 1991-2010	702	
Soil type	Luvisol	
Soil texture	Silty-Loamy	
pH(CaCl ₂) ¹ -Value	6.6	7.2
Previous crop	Maize	Wheat
Crop rotation	Wheat//Barley/Maize	Rye/Maize/Wheat all five years additional oil seed rape or sugar beets or fallow
mg P g ⁻¹ DM soil	0.6	1.2
mg K g ⁻¹ DM soil	1.8	1.8
Soil total carbon (% DM) 0-30 cm	2.32	1.29
Soil nitrogen (% DM) 0-30 cm	0.24	0.19
Livestock units ha ⁻¹	1.5	0
Last manure fertilization and total amount of fertilized N	Since 2001 annually 20 t FM stable cattle manure ha ⁻¹ containing ca. 90 kg total N ha ⁻¹	In 2004 and 2007 a single applications of liquid cattle manure 15 m ³ ha ⁻¹ , each containing ca. 45 kg total N ha ⁻¹

Weather conditions during the experimental years

Some specific weather conditions during the growing periods were observed. In 2011, temperatures during the first two weeks of April were particularly low. Furthermore, precipitation was low between March and May in both years (Table 2).

Table 2: Precipitation and temperature during the three experimental years in comparison to the 1991-2010 average

	Temperature			Precipitation		
	Average °C 91-10	°C 2011	°C 2012	Average mm 91-10	mm 2011	mm 2012
Mar	4.7	6.0	7.3	52.1	25.2	7.7
Apr	8.6	11.5	8.1	40.6	20.9	42.3
May	13.0	14.3	14.3	81.0	25.0	43.1
June	16.2	16.5	16.3	72.6	111.4	116.5
July	17.9	15.8	17.3	84.2	61.6	96.0
Aug	17.4	18.4	19.2	70.6	54.4	39.3

Experimental design N-treatments and N-supply calculations

Identical N fertilization treatments were tested in the two experiments. The experiments were conducted with five replications in a fully randomized block design.

The plot size was 40 m² (20 m² harvest plots and 20 m² sample plots). In both years, sowing of winter wheat (variety “Akteur”) took place in the middle of October under optimal conditions. The sowing rate in 2011 was 300 and in 2012 320 kernels m⁻². Plant protection was applied as needed. All experiments were managed without use of any growth regulators.

CAN (27 % N) and Urea-Ammonium-Solution (UAN, 40 % N) were used as N fertilizers. CAN was applied with a box fertilizer spreader. UAN was applied as banded surface application with common pesticide sprayers in combination with trailing hoses. The calculated N supply is shown in table 3. Below, we refer to fertilizations with a serving at BBCH stage 25/27 as “early application” fertilizations with a first dose at BBCH 29/31 as “late application”. The N fertilizers were applied at different dates and servings according to Table 3.

Table 3: Nitrogen fertilizer splitting and timing of the tested treatments in the two experimental years 2011 and 2012 (BBCH = growing Stage; CAN= calcium ammonium nitrate; UAN= Urea ammonium nitrate solution, Early application= early first N application at tillering BBCH 25/27 Late application= late first N application at shooting BBCH 29/31)

		Application time (BBCH)		
		BBCH 25/27 tillering	BBCH 29/31 shooting	BBCH 49/51 heading
		Application dates		
		24.03.2011	20.04.2011	30.05.2011
		27.03.2012	18.04.2012	31.05.2012
Treatment no.				
	Early applications			
1	3x CAN	30 %	40 %	30 %
2	1xCAN early ¹	100 %		
	Late applications			
3	2x CAN late ²		70 %	30 %
4	1xCAN late ²		100 %	
5	1x UAN late ²		100 %	
	Control plots			
6	Without N fertilization			
7	Fallow plots			

To estimate the mineralization potential, fallow plots without any N fertilization were established (N0fallow) as a second control in addition to the control without any N fertilization (N0) but with winter wheat. Weeds at the fallow plots were removed using herbicides.

Sampling, measurement and calculation

Soil samples to measure N_{\min} content (NO_3-N) were taken at both experiments.

To calculate the N supply, soil samples were taken at the beginning of the growing season. Additionally, soil samples were taken at the BBCH stages 29/31 and 49/51 and after harvest in order to analyse the N mineralization. These samples were also taken in the fallow plots. All samples were taken in 0-30, 30-60 and 60-90 cm depth. The soil samples were frozen directly after sampling. For extraction NO_3-N , we used a 200 ml 0.025 M $CaCl_2$ solution. Analysis was made with the Foss Tecator 5012 Analyser.

To calculate N in the shoots, plant samples were taken of 0.36 m² at the BBCH stage 29/31, 39/41 and 49/51. At all sites, straw samples were taken, too (0.66 m²).

At harvest, we used a combine harvester with a scale. The measured yield per plot was the basis to calculate the yield per hectare. In order to calculate shoot N contents, we analyzed the N content of the different plant materials using the Elementary Analyzer Vario MAX CNS. Prior to the analysis, we dried the samples for 24 hours at 60 °C. The protein content was calculated from the total N content by multiplication with the factor 5.7 (TELLER, 1993).

The N demand was calculated applying German Fertilization Regulations. From the calculated N demand we subtracted the N_{min} content in spring as well as the estimated N delivery during vegetation period provoked by soil, pre crops residues or long-term manure fertilization, according to official tabulated values (Table 4).

Table 4: Calculation of nitrogen requirement for the experimental years 2011 and 2012

* estimated from tabulated values of official extension services

	2011		2012	
	Experiment		Experiment	
	1	2	1	2
N-fertilizer (CAN or UAN), (kg N ha ⁻¹)	155	185	155	185
N_{min} content spring, (kg NO ₃ - N ha ⁻¹)	55	35	55	35
*N-delivery manure, fertilization (kg N ha ⁻¹)	10		10	
*N-delivery soil (kg N ha ⁻¹)	10	10	10	10
N-supply (kg N ha⁻¹)	230	230	230	230

For the calculation of the N recovery different methods were applied (e.g. Olsen et al. 1964; Moll et al. 1982; Ma et al. 1999). The single steps for this calculation at the dry matter basis are described in the following

1. Nitrogen yield grain (NYG) was calculated:

$$NYG = GB \times GN \quad \text{Equ. 1}$$

Where GB is the harvested grain biomass (kg ha⁻¹) and GN is the nitrogen concentration in the grain biomass (% N). Straw was not considered as it remained on the field.

2. Apparent N in grain derived from soil N mineralization (% NdfS)

$$\% NdfS = \frac{Nyield_{grain} - N \times 100}{(Nyield_{grain} + N)} \quad \text{Equ. 2}$$

Where $Nyield_{grain}$ is the relative amount of harvested N from the plots without N fertilization (-N) divided by the plots with N fertilization (+N).

3. Apparent Nitrogen fertilizer recovery (%NFR)

$$NFR = \left(\frac{NYG - NYG_{N0}}{Nfert} \right) \times 100 \quad \text{Equ. 3}$$

NFR is calculated when the Nitrogen grain yield minus the Nitrogen grain yield (N_0) divided with N_{fert} (amount of N fertilizer) and describes how much of the fertilizer amount is removed from the field.

4. As last step, the N input/output ratio (N_{io}) was calculated.

$$N_{io} = \frac{N_{fertilized}}{N_{yield\ grain}} \quad \text{Equ. 4}$$

The N input/output ratio is a simple calculation to quantify the share of fertilizer apparently removed from the yield without considering the mineralization of the soil. Values below 1 indicate that less N was fertilized than removed from the field. Values above 1 indicate that more N was fertilized than removed from the field. This calculation may be interpreted as a simplified N-balance.

Statistical analysis

The data analysis was made using the SAS 9.2 statistical package and SigmaPlot ver. 11.0. Prior to the one-way ANOVA, data were checked for normal distribution of the residuals and homogeneity of variances. Significant effects indicated by the F-test ($p < 0.05$), were followed by comparison of means using the Tukey-Test. To analyse the factor treatment in one year and one experiment the following model was used.

$$y = \mu + N\text{-treatment} + \text{block} + e.$$

For all comparisons between the experiments we used only descriptive methods.

Results

Grain yield and crude protein

At both sites in 2011, grain yields in the simplified CAN fertilization treatments were never significantly lower than in the established fertilization strategy 3xCAN. Under the treatment 2xCAN late of experiment 1, grain yields were even significantly higher than under treatment 3xCAN. Only in 2011 and experiment 2, the treatment 1xUAN late had significantly lower grain yields compared to 3xCAN and 1xCAN late. In 2012, no significant difference could be detected between the fertilization treatments. In 2011, grain yields under the treatments without N fertilization were 76.1 % and 64.9 % of the yields in the early and late fertilized plots in experiments 1 and 2 respectively. In 2012, the grain yields under the treatments without N fertilization were 66.1 % and 34.3 % respectively. In both years, early or late application and different number of servings did not affect the grain yield. Furthermore, the yield level in both years were slightly higher in experiment 2 (Table 5).

Table 5: Winter wheat grain yield (mg DM ha⁻¹) of different N fertilizations (letters indicate significant differences between N fertilization within one year and one experiment, Tukey-test, p<0.05, SE = standard error of the mean, early applications = early first N application at tillering, late applications = late first N application at shooting)

Treatment no.	Fertilization strategy	2011		2012	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
	Early applications				
1	3x CAN	6.8b	7.8c	5.5b	6.8b
2	1xCAN early	7.0bc	7.3bc	6.2b	6.8b
	mean (1-2)	6.9	7.5	5.8	6.8
	Late applications				
3	2x CAN late	7.6c	7.4bc	6.1b	6.5b
4	1xCAN late	7.3bc	7.9c	5.6b	6.8b
5	1xUAN late	7.0bc	6.7b	6.0b	6.5b
	mean (3-5)	7.3	7.3	5.9	6.6
	Control plots				
6	Without N fertilization	5.4a	4.8a	3.9a	2.3a
7	Fallow Plots	/	/	/	/
	Mean (1-5)	7.1	7.4	5.9	6.7
	Relative yield of treatment 6 to treatments 1-5	76.1%	64.9%	66.1%	34.3%
	SE±	0.3	0.3	0.14	0.24

Between the experimental years, protein contents differed more than 2 %.

In 2011 and experiment 1, only the treatments 1xCAN early and 1xUAN late, showed significantly lower protein contents in comparison to 3xCAN. In experiment 2, only the

treatment 1xCAN early showed lower protein contents than treatment 3xCAN. In 2012 and experiment 1, only treatment 2xCAN late showed no significant lower protein contents than 3x CAN. In experiment 2, all tested fertilization strategies showed no significant differences in comparison to 3xCAN. In each year, the unfertilized plots show similar crude protein contents (Table 6).

Table 6: Protein content (mg g^{-1}) of different N fertilizations (letters indicate significant differences between N fertilization in one year and one experiment, Tukey-test $p < 0.05$, SE = standard error of the mean, Early applications = early first N application at tillering, late applications = late first N application at shooting)

Treatment no.	Fertilization strategy	2011		2012	
		Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
	Early applications				
1	3x CAN	159c	153c	147d	126bc
2	1xCAN early	144b	134b	131bc	117b
	mean (1-2)	152	144	139	122
	Late applications				
3	2x CAN late	162c	164d	139cd	127c
4	1xCAN late	156c	158cd	129bc	119bc
5	1xUAN late	147b	154c	126b	123bc
	mean (3-5)	155	159	131	123
	Control plots				
6	Without N fertilization	108a	106a	97a	99a
7	Fallow Plots	/	/	/	/
	Mean (1-5)	154	153	134	122
	SE±	2.6	3.1	3.7	3.2

N-concentration plant material (BBCH stage 29/31, 39/41, 49/51)

In 2012, N concentrations in both experiments were higher than in 2011.

In 2011 and in both experiments, early fertilization dates increased plant N concentrations at BBCH stage 29/31. In 2012, early fertilization dates increased plant N contents at BBCH stage 29/31 only in experiment 2. In all other cases, in 2011 and 2012, no differences in plant N concentrations were found (Fig. 1).

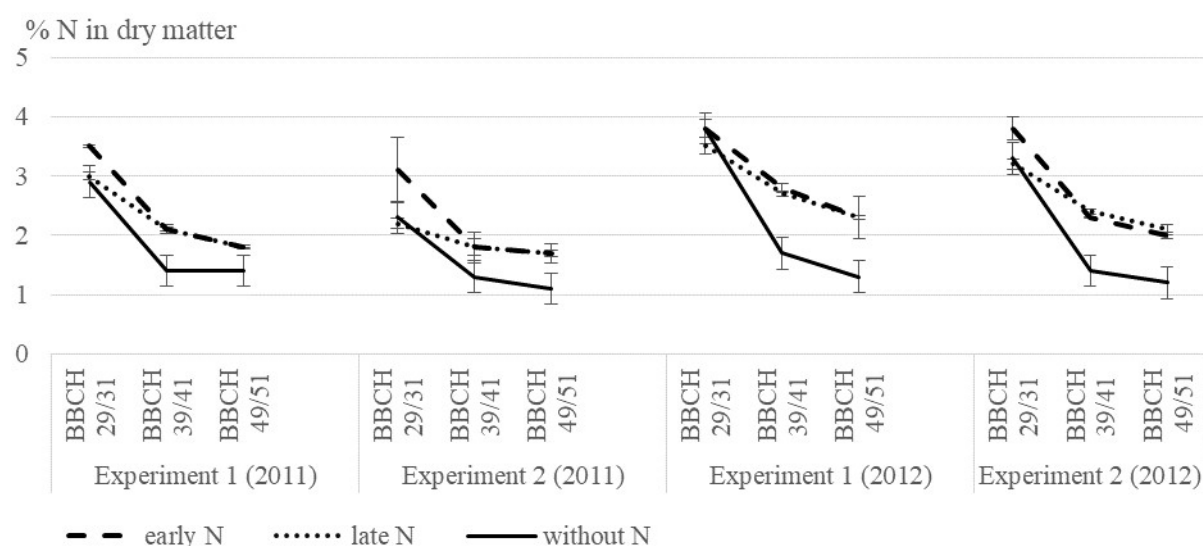


Fig. 1: N-concentration (% N in dry matter) in the above ground biomass of different N fertilization treatments at different BBCH stages (error bars show the standard error of the mean) in 2011, early = early first N application at tillering late = late first N application at shooting, without = no N fertilization)

N-dynamics, mineralization potential and N displacement

In both years, N_{\min} contents in the fallow plots of experiment 1 (0-90 cm) indicate a higher N-pool as in experiment 2. Also, early fertilization dates (BBCH 25/27) increased N_{\min} contents measured at BBCH stage 29/31. Besides the typical mineralization in the soil layer 0-30 cm, mineralization was also found in the soil layer 30-60 cm in both years and both experiments. In 2011, experiment 2 showed similar N_{\min} contents as experiment 1 after harvest. In both years, experiment 1 showed at BBCH stages 29/31 and 49/51 higher N_{\min} contents than experiment 2.

Fields with long-term manure application also showed higher N_{\min} contents at the beginning of vegetation than fields with no long-term manure application.

Also the measured N_{\min} values in a depth 30-60 cm (2011 and 2012) and 60-90 cm (2012) indicate higher occurrence of nitrogen in experiment 1 than in experiment 2 (Fig. 2).

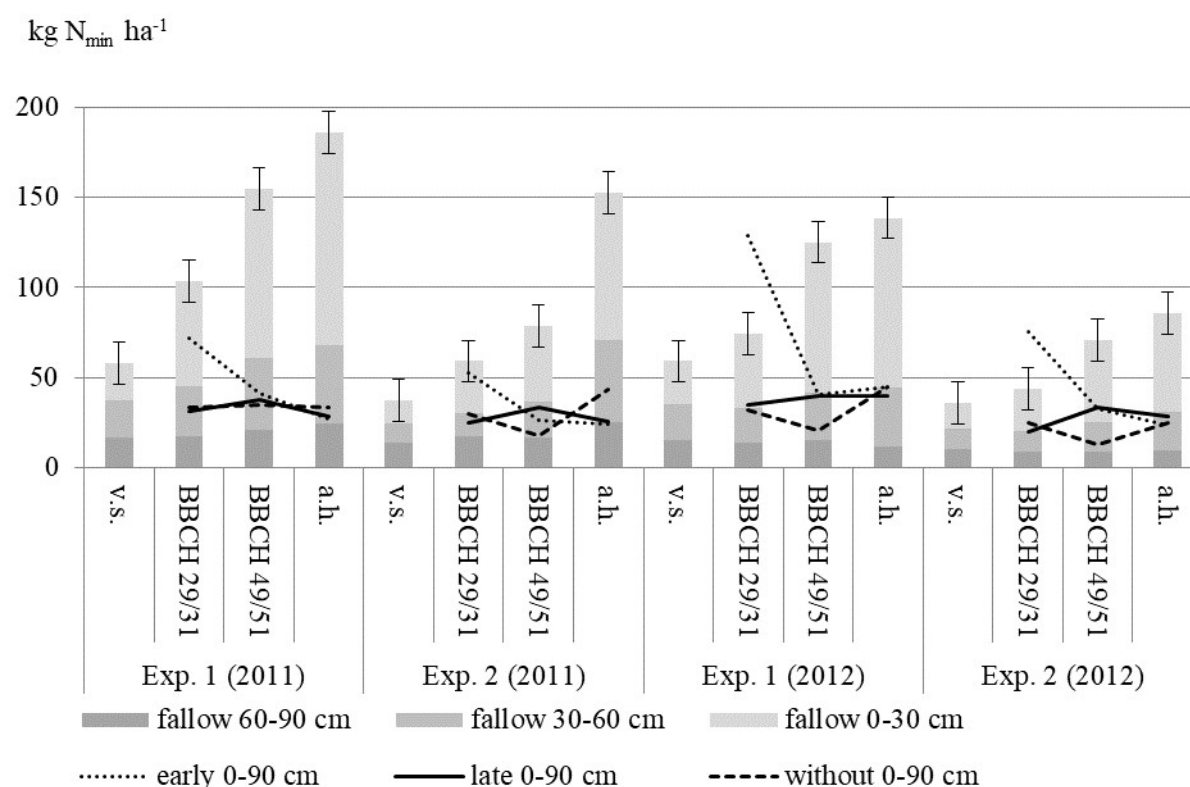


Fig. 2: Development of N_{\min} (kg N ha⁻¹) in the fallow plots and the different N treatments in 2011 and 2012 in a depth 0-90 cm (error bars show the standard error of the mean), v.s. = vegetation start, a.h. = after harvest, early = early first N application at tillering, late = late first N application at shooting, without = without N-fertilization)

Fallow plots at both experiments exhibited a high mineralization potential.

In 2011, both experiments shown a high mineralization potential measured in the fallow plots. We found also high values in both experiments when is calculating the N uptake (grain

and straw). In 2012 the level of these measures was lower and the difference between the experiments was higher.

The N content in straw and grain, and the N_{\min} content after harvest were consistent with the mineralized amount of N in the fallow plots. Both, measurements and calculations, demonstrated the high mineralization potential of the soil in the experimental fields and the impact of a long-term manure application (Table 7).

Table 7: N-uptake (grain and straw) and mineral N of the fallow plots and the unfertilized plots at both years 2011 and 2012 \pm SD=Standard Deviation of the mean, w.n.f. = without nitrogen fertilization, a.h. = after harvest)

		2011				2012			
		Exp. 1		Exp. 2		Exp. 1		Exp. 2	
		fallow	w.n.f.	fallow	w.n.f.	fallow	w.n.f.	fallow	w.n.f.
1	N uptake		29.8		24.6		21.6		18.3
	straw (kg ha^{-1})	/	± 8.11	/	± 8.04	/	± 7.77	/	± 10.35
2	kg N uptake		102.2		87.7		65.4		40.2
	grain (kg ha^{-1})	/	± 10.02	/	± 17.57	/	± 9.26	/	± 6.05
3	N_{\min}	186.2	33.2	152.6	43.2	138.5	45.1	85.5	25.2
	a.h. (kg ha^{-1})	± 37.54	± 10.55	± 14.14	± 9.44	± 36.30	± 16.19	± 24.20	± 2.91
sum of 1-3		165.2		155.5		132.1		83.7	

N yield (grain), N fertilizer recovery (NFR) and N input/output ratio (Nio)

In general, in 2011 N grain yields were mostly higher than the applied amount of N fertilizer, so N input/output ratios < 1 . In 2012, the N input/output ratio in both experiments was > 1 . In both experiments in 2011, we found a tendency that the treatment 1xCAN early shown a lower nitrogen grain yield (NYG) compared to all other CAN treatments. 2012 this effect appeared only in experiment 1 (Table 8).

Table 8: Grain nitrogen yield (NYG), apparent N derived from soil (% Ndfs), N fertilizer recovery (% NFR) and N input/output ratio ($N_{i/o}$) at both experiments in the years 2011 and 2012 (letters indicate significant differences between the treatments in one year and one experiment, T-test $p < 0.05$, \pm = SE=Standard Error of the mean)

Treatment no.	1	2	3	4	5	6	
	1xCAN early	3xCAN	1xCAN late	2xCAN late	1xUAN late	w.n.f	Mean 1-5
Experiment 1 2011							
NYG (kg ha^{-1})							192.1
	177.4b	188.9bc	199.9bc	213.7c	180.4bc	102.2a	± 5.85
% Ndfs	57.61	54.1	51.1	47.8	56.7	100.0	
% NFR	48.5	55.9	63.0	71.9	50.5	/	
$N_{i/o}$	0.87	0.82	0.78	0.73	0.86	/	
Experiment 2 2011							
NYG (kg ha^{-1})							199.9
	181.7bcd	208.4bcd	216.2cd	214.4cd	179.0b	87.7a	± 7.51
% Ndfs	48.3	42.1	40.6	40.9	49.0	100.0	
% NFR	50.8	65.2	69.5	68.5	58.9	/	
$N_{i/o}$	1.02	0.89	0.86	0.86	1.03	/	
Experiment 1 2012							
NYG (kg ha^{-1})							137.5
	126.2b	141.6bc	139.7bc	147.8bc	132.1bc	65.4a	± 3.62
% Ndfs	51.8	46.2	46.8	44.2	49.5	100.0	
% NFR	39.2	49.2	47.9	53.2	43.0	/	
$N_{i/o}$	1.23	1.09	1.10	1.05	1.17	/	
Experiment 2 2012							
NYG (kg ha^{-1})							143.9
	140.0b	151.4b	142.6b	145.3b	140.5b	40.2a	± 3.69
% Ndfs	28.7	26.6	28.2	27.7	28.6	100.0	
% NFR	53.9	60.1	55.4	56.8	64.7	/	
$N_{i/o}$	1.32	1.22	1.29	1.27	1.31	/	

Discussion

According to hypotheses 1 fields with long term manure application (experiment 1) and consequently high N mineralization potential contributed to a higher extent to the N supply of winter wheat than fields that have been applied with mineral N fertilizer for many years (experiment 2). Our results are in accordance with the results of EDMEADES (2003), who described that manure application increases the N pools in soils. Furthermore, we could confirm the results of EGHBALL et al. (2002), who could show that long-term fertilization with manure resulted in a successive displacement of nitrate into deeper soil layers. The N_{min} contents at the beginning (0-90 cm) of the vegetation and the estimated mineralization potential in the fallow plots were indicative for this larger N pool with a high mineralization potential in experiment 1 compared to experiment 2 (Fig. 2).

As a result, yields in the non-fertilized treatments of experiment 1 were higher compared to experiment 2 (Tab. 5). Nevertheless, in 2012, in experiment 2 a significantly higher grain yield was found than in experiment 1 (Table 5). The lower yield level was most probably also influenced by the different pre-crops (experiment 1: maize, experiment 2: wheat). Many experiments showed a higher risk for an infection with *Fusarium graminearum* and a lower grain yield level when the previous crop was maize (SEAMAN 1982; SUTTON 1982, TEICH and NELSON 1984; DILL MACKY and JONES 2000).

The results also confirmed hypothesis 2. In our experiments, early applications, especially to BBCH stage 25/27 were not necessary to produce high grain yields. MAIDL et al. (1998) found that excessive N supply in early stages reduced ear formation. Thus, early N servings increase the number of tillers but decreased the development of the main stem. According to FISCHBECK et al. (1990) such effects were even more pronounced at sites comparable to experiment 1 with high mineralization rates. However, we could also find this in experiment 2 which we chose as an experiment with low mineralization potential. Dieckmann and FISCHBECK (2005) found similar results by testing the wheat cultivars "Toronto" and "Bartis". Early high N supplies in wheat reduced N remobilization and translocation from straw to the kernels (STICKSEL et al. 1998). Our results confirmed these findings. In 2011, the treatment 1x CAN early lead to significant lower protein contents, but not in 2012. Also one explanation could be the cold weather in the early vegetation period in 2012, which slowed down the growing rates and the N uptake by the plants. Consequently, this lead to higher N amounts in the soil at later growing stages.

In this context, early applications increased the N_{\min} content especially in the upper soil layers and increased the risk for N runoffs with no advantage for plant growing.

In accordance to hypotheses 3 reducing the number of N servings was possible without negative effects on grain yield. All tested treatments with a reduced number of N servings showed the same yield as treatment 3xCAN. These results were found also in experiment 2. The N pool at experiment 2 (with long-term mineral N-fertilizer application) was able to balance possible N lacks caused by omitted N servings. Good conditions for microbial activity in the upper soil layers (C/N ratio: 9; pH: 7.2) and high soil borne fertility could be one explanation for this observation. These results are not transferable when wheat is cultivated on shallow or sandy soils with a lower microbial activity.

For quality wheat production, the protein content is important. In experiment 1, the treatments 1xCAN early and 1xUAN late showed significantly lower protein contents than 3xCAN late. In experiment 2 only 1xCAN early showed this effect.

In 2012 and experiment 1, only the treatment 2xCAN late did not show significantly lower protein contents than the treatment 3xCAN. In experiment 2, no clear results were found.

In consideration of these results, hypothesis 4 cannot be confirmed. For the production of high protein wheat, fertilization strategies with a late first application (1xCAN late) date or a combination with a late first N application and an application at BBCH stage 49/51 were successful. If the first application is late, the application to the heading stage (BBCH 49/51) could be omitted. Without special payment agreements, which honour protein contents higher than the requirements, a fertilization strategy for increasing the protein contents is not promising. All tested treatments fulfil the protein requirements.

Another point is the temporary high N supply when fertilized just in one N dose. Such high N doses may increase the risk for infection with plant diseases, e.g. *Erysiphe graminis* (TOMPKINS et al. 1992; JENSEN and MUNK 1997; OLESEN et al. 2003). In our experiments, plant protection did not differ between the treatments and was applied according to necessity. We could not observe any differences in the fungal diseases expansion or lodging between the treatments. In order to understand the interaction between fungal infections and the tested treatments, particularly treatments like 1xCAN early or 1x CAN late, further research is necessary. Also important are further investigations on shallow or sandy soils to analyse the risk of nitrate leaching when nitrogen is applied with simplified treatments. In view of the high mineralization potential and the higher N_{\min} contents (e.g. experiment 1) especially to the

beginning of the vegetation also further investigations needed to consider the long-term effects of the application of manure.

Conclusion

In general, in both experiments, there was no need for splitting nitrogen servings. Simplified fertilizations were successful when the field was not long-term manure fertilized (experiment 2) but the soil properties on this experiment are high. With simplified strategies in winter wheat, yield and qualities were comparable with conventional 3 servings. Only when fertilized in one dose to BBCH stage 25/27 the protein contents were particularly low. The traditional nitrogen splitting practice to winter wheat able to manage high yields with high protein contents but under some conditions not necessary. In our experiments the conditions are on the one hand the long-term manure application and on the other hand the high soil borne fertility. For balancing the omitted nitrogen servings, a high mineralization potential as in experiment 1 was not needed. The higher N mineralization potential in experiment 1 did not result in advantages for plant growth.

Acknowledgements

The authors are grateful to the reviewers for their helpful suggestions and comments. We thank the technical staff of the Research Station Ihinger Hof. We would also like to thank all employees of the Institutes group 340i (Fertilization and Soil matter Dynamics), particularly the group 340c of Mr. Hans-Peter Piepho (Biostatistics).

We thank the Ministry of Rural Areas and Consumer Protection of the federal state of Baden-Württemberg, Germany, for financial support.

References

- BECKWITH, C.P., COOPER, J., SMITH, K.A., SHEPHERD, M.A. (1998)
Nitrate leaching loss following application of organic manures to sandy soils in arable cropping. I. Effects of application time, manure type, overwinter crop cover and nitrification inhibition, *Soil Use and Management* 14, 123-130
- BITTMANN, S., FORGE, T.A., KOWALENKO, C.G. (2005)
Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer, *Soil Biology & Biochemistry* 37, 613-623
- CAMPBELL, C.A., ZENTNER, R.P., SELLES, F., MCCONKEY, B.G., DYCK, F.B., (1993)
Nitrogen management for spring wheat grown annually on zero-tillage: yield and nitro-gen use efficiency. *Agronomy Journal* 85, 107-114.
- CARPENTER, S., CARACO N.F., CORELL, D.L., HOWARTH, R.W., SHARPLEY, A. N., VAL, H.S., (1998)
Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen, *Issues in Ecology*, Number 3
- DAMBREVILLE, C., HÉNAULT, C., BIZOUARD, F., MORVAN, T., CHAUSSOD, R., GERMON, J-C. (2006)
Compared effects of long-term pig applications and mineral fertilization on soil denitrification and its end products (N₂O, N₂)
Biology and Fertility of Soils 42, 490-500
- DIECKMANN, F., and FISCHBECK, G., (2005)
Differences in Wheat Cultivar Response to Nitrogen Supply. II: Differences in N-Metabolism-Related Traits, *Journal of Agronomy and Crop Science* 191, 362-376.
- DILL MACKY, R., and JONES, R.K., (2000)
The Effect of Previous Crop Residues and Tillage on Fusarium Head Blight of Wheat
Plant Diseases volume 84, No. 1
- EDMEADES, D. C. (2003)
The long-term effects of manures and fertilisers on soil productivity and quality: a review, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66: 165-180.
- EGHBALL et al. (2002)
Long-term manure and fertilizer application effects on phosphorus and nitrogen in runoff, *Transactions of the ASAE*, 45(3):687-694.
- FISCHBECK, G., DENNERT, J. und MÜLLER, R. (1990)
N-Dynamik des Bodens, Ertragsbildung und Stickstoffentzug von Winterweizen bei unterschiedlicher Höhe und Verteilung der mineralischen N-Düngung. *Journal of Agronomy and Crop Science* 164, 297-311.

- HABTESELASSI, M., Y., STARK, J.M., MILLER, B.E., THACKER, S., G., NORTON, J.,M., (2006)
Gross Nitrogen Transformations in an Agricultural Soil after Repeated Dairy-Waste Application, *Soil Science Society of America Journal* 70, 1338-1348.
- HAO, X., CHANG, C., TRAVIS, G.R., ZHANG, F., (2003)
Soil carbon and nitrogen response to 25 annual cattle manure applications
Journal of Plant Nutrition and Soil Science 166 (239-245)
- HAROLD, M. van Es, SOGBEDJI, J., M., SCHINDELBECK, R.R., (2006)
Effect of Manure Application Timing, Crop, and Soil Type on Nitrate Leaching
Journal of Environmental Quality 35, 670 – 679.
- HJORTH, M., CHRISTENSEN, K.V., CHRISTENSEN, M. L., Sommer, S.G., (2010)
Solid–liquid separation of animal slurry in theory and practice. A review
Agronomy for Sustainable Development 30, 153–180.
- JENSEN, B., MUNK, L., (1997)
Nitrogen induced changes in colony density and spore production of *Erysiphe graminis* f.sp. *hordei* on seedlings of six spring barley cultivars,
Plant Pathology 46, 191–202.
- KANDELER, E., LUXHØI, J., TSCHERKO, D., MAGID, J., (1999a)
Xylanase, invertase and protease at the soil-litter interface of a loamy sand.
Soil Biology & Biochemistry 31, 1171 – 1179.
- KANDELER, E., STEMMER, M., KLIMANEK, E.-M., (1999b)
Response of soil microbial biomass, urease and xylanase within particle size fractions to long-term soil management. *Soil Biology & Biochemistry* 31, 261 – 273.
- KIRCHMANN, H., HABERHAUER, G., KANDELER, E., SESSITSCH, A., GERZABEK, M.H., (2004)
Effects of level and quality of organic matter input on carbon storage and biological activity in soil: Synthesis of a long-term experiment
Global Biochemical Cycles, Vol. 18, GB4011.
- LADHA, J.K., PATHAK, H., KRUPNIK, T.J., SIX, J., van KESSEL, C., (2005)
Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects.
Advances in Agronomy 87, 85-156.
- LÓPEZ-BELLIDO, L., LÓPEZ-BELLIDO, R.J., CASTILLO, J.E., LÓPEZ-BELLIDO, F.J., (2000)
Effects of tillage, crop rotation, and nitrogen fertilization on wheat under rainfed Mediter-ranean conditions. *Agronomy Journal* 92, 1054-1063.
- LÓPEZ-BELLIDO, L., MUNÓZ-ROMERO, V., BENÍTEZ-VEGA, J., FERNÁNDEZ-GARCÍA, P., Redondo, R.,
RAFAEL J. LÓPEZ-BELLIDO, R.J., (2012)
Wheat response to nitrogen splitting applied to a Vertisols in different tillage systems and cropping rotations under typical Mediterranean climatic conditions
European Journal of Agronomy 43 24-32.

- MA, B. L., DWYER, L.M., GREGORICH, E.G., (1999)
Soil Nitrogen Amendment Effects on Nitrogen Uptake and Grain Yield of Maize
Agronomy Journal 91, 650-656.
- MAHLER, R.L., KOEHLER, F.E., LUTCHER, L.K., (1994)
Nitrogen source, timing of application, and placement: effects on winter wheat
production. *Agronomy Journal* 86, 637-642.
- MAIDL, F. X., STICKSEL, E., RETZER, F. and FISCHBECK, G. (1998).
Effect of varied N-fertilization on yield formation of winter wheat under particular
consideration of mainstems and tillers. *Journal of Agronomy and Crop Science* 180,
15-22.
- MALLORY, E.B. and GRIFFIN, T.S. (2007)
Impacts of soil amendment history on nitrogen availability from manure and
fertilizer. *Soil Science Society of America Journal* 71, 964-973.
- MARSCHNER, P., KANDELER, E., MARSCHNER, B., (2003)
Structure and function of the soil microbial community in a long-term
fertilizer experiment, *Soil Biology and Biochemistry* 35, 453-461.
- MOLL, R.H., KAMPRATH. JACKSON, W.A., (1982)
Analysis and Interpretation of Factors Which Contribute to Efficiency of Nitrogen
Utilization, *Agronomy Journal* 74, 562-564.
- OLSEN, R.A., C.A. THOMPSON, P.H. GRABOVESKI, D.D. STUKENHOLTZ, K.D. FRANK, and A.F. DREIER.
1964.
Water requirement of grain crops as modified by fertilizer use. *Agron. J.* 56, 427-432.
- OLESEN J. E., JØRGENSEN, L.N., PETERSEN, J., MORTENSEN, J.V., (2003)
Effects of rates and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in
winter wheat. 2. Crop growth and disease development
Journal of Agricultural Science, 140, 15–29.
- PAUL, J.W., ZEBARTH, B.J., (1997)
Denitrification and nitrate leaching during the fall and winter following dairy cattle
slurry application, *Canadian Journal of Soil Science* 77, 231-240.
- RECOUS, S., MACHET, J.M., (1999)
Short-term immobilization and crop uptake of fertilizer nitrogen applied to winter
wheat: effect of date of application in spring. *Plant Soil* 206, 137–149.
- ROCHETTE, P., BOCHOVE, E. van, PRÉVOST, D., ANGERS, D. A., CÔTÉ, D., BERTRAND N., (2000), ,
Soil Carbon and Nitrogen Dynamics Following Application of Pig Slurry
for the 19th Consecutive Year: II. Nitrous Oxide Fluxes and Mineral Nitrogen
Soil Science Society of America. Journal 64, 1396–1403

- SAS INSTITUTE Inc., (2008)
SAS users guide: The mixed procedure. SAS Institute Inc Cary, NC, USA
- SYSTAT SOFTWARE Inc, SigmaPlot ver. 11.0 San Jose, CA, USA
- SCHULZ, R., MAKARY, T., HUBERT, S., Hartung, K., GRUBER, S., DONATH, S., DÖHLER, J., Weiß, K., EHRHART, E., CLAUPEIN, W., PIEPHO, H-P., PEKRUN, C., MÜLLER, T. (2014)
Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? On-farm research on Luvisols in South-West Germany The Journal of Agricultural Science 153, 575-587.
- SCHRÖDER; J, J, and UENK, D., and G. J. HILHORST, G., J. (2007)
Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland
Plant Soil (2007) 299:83–99
- SEAMAN, W. L., (1982)
Epidemiology and control of mycotoxigenic fusaria on cereal grains.
Canadian Journal Plant Pathology 4, 187-190.
- SELING, K., Ni, K., KAGE, H., (2014)
Application of pig slurry—First year and residual effects on yield and N balance
European Journal of Agronomy 59, 13–21
- STICKSEL, E., MAIDL, F.X., RETZER, F., FISCHBECK, G., (1998)
Nitrogen Uptake and Utilization in Winter Wheat under Different Fertilization Regimes\ with Particular Reference to Main Stems and Tillers
Journal of Agronomy and Crop Science 183, 47-52
- STOCKDALE, E.A., GAUNT, J.L., VOS, J., (1997)
Soil-plant nitrogen dynamics: what concepts are required? European Journal of Agronomy 7, 145-159.
- SUTTON, J.C., (1982)
Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by Fusarium graminearum. Canadian Journal Plant Pathology 4:195-209
- TEICH, A.H., NELSON, K., (1984)
Survey of fusarium head blight and possible effects of cultural practices in wheat fields in Lambton County in 1983, Canadian Plant Diseases Survey 64, 11-13
- TELLER, G. L. (1932), Non-protein nitrogen compound in cereals and their relation to the nitrogen factor for protein in cereals and bread. Cereal Chemistry 9: 261–274. Cited in: Lopez-Bellido, R. J., Shehepherd, C. E. and Barraclough P. B. (2004). Predicting post-anthesis N requirements of bread wheat with a Minolta SPAD meter European Journal of Agronomy 20, 313-320.

- TOMPKINS, D.K., WRIGHT, A.T., FOWLER, D. B. (1992).
Foliar disease development in no-till winter wheat: influence of agronomic practices on powdery mildew development, Canadian Journal of Plant Science 72, 965–972.
- WEBB, J., MENZI, H., PAINC, B.F., MISSELBROOK, T.H., DÄMGEN, U., HENDRIKSE, H., DÖHLER, H., (2004)
Managing ammonia emissions from livestock production in Europe, Environmental Pollution 13, 399-406.

3 Allgemeine Diskussion

3.1 Einfluss der Sorteneigenschaften

Moderne Winterweizensorten zeigen geringe Harvest-Indizes was direkten Einfluss auf die Lagerneigung hat. Ein Beleg dafür ist, dass in keinem der insgesamt sechs Versuchsjahre Lagergetreide aufgetreten ist, wobei keinerlei Wachstumsregulatoren verabreicht worden sind. Hinsichtlich der Ausprägung ihrer Ertragskomponenten ist eine hohe Plastizität anzunehmen. In der Vergangenheit war diese fehlende Plastizität sowie die Gefahr von Lagergetreide mitunter Grund für die Etablierung des geteilten Düngeverfahrens (KANWAR et al. 1988; VARSHNEY et al. 1993). Ziel dieses Düngeverfahrens war es, den Gehalt an pflanzenverfügbarem N im Boden mit dem Bedarf der Pflanze zu synchronisieren. Demgegenüber stehen jedoch die Fähigkeiten der Pflanzen, temporär hohe N-Konzentrationen effektiv nach der Blüte umverlagern zu können (AUSTIN and JONES 1975; AUSTIN et al 1977; PAPA KOSTA and GAGIANAS 1991). Im Hinblick auf die geteilte Düngung ist jedoch auch eine zu starke Düngung im Stadium der Bestockung (BBCH 25) als kritisch zu erachten. MAIDL et al. 1998 fanden heraus, dass gerade in frühen Stadien zu hohe N-Mengen Reduktionsprozesse initiieren, was zu geringeren Kornanlagen führt. Demgegenüber standen positive Effekte der frühen N-Gaben bezüglich der Ausbildung von einer ausreichenden Bestandesdichte (ALCOZ et al. 1993; HAMID 1972). Die richtige Bestandesführung, insbesondere die erste Teilgabe, war dennoch schon immer ein Konflikt zwischen dem Fördern der Bestandesdichte und Reduktionsprozessen bei der Kornanlage. Unter den Bedingungen unserer Versuche führten frühe N-Teilgaben teilweise zu höheren Bestandesdichten, in keinem der Fälle jedoch zu höheren Kornerträgen. Dies traf für alle getesteten Sorten zu. Sorten mit einer Neigung zum Bestandesdichtetyp zeigten zwar generell höhere Bestandesdichten, reagierten auch auf frühe Düngetermine, jedoch führten diese nicht zu den höchsten Kornerträgen. Die in der BSL benotete Ausprägung der Ertragskomponente „Bestandesdichte“ kann anhand dieser Versuche bestätigt werden. Den hier zugrunde liegenden Experimenten zufolge sind die heutigen Sorten in der Lage temporäre N-Defizite durch eine N-Umverlagerung in der Pflanze gut zu kompensieren. So fanden BOELCKE (2001), KÜCKE (2001a) und SOMMER (2000) ähnliche Effekte bei platzierten N-Applikationen. Es ist zu erwähnen, dass der Kompensationseffekt seitens des Standorts (N-Nachlieferungspotential) auf dem Versuchsstandort als gering einzuordnen ist. Zwar ist dort

eine tiefgründige Parabraunerde zu finden, jedoch wurden seit 30 Jahren keine organischen Dünger appliziert. Zu erkennen ist dies an den geringen Erträgen der mit N ungedüngten Kontrolle. Diese Thematik wird unter Punkt 3.2 ausführlich erläutert. Ein weiterer Effekt der Kompensation ist hinsichtlich der Düngung zu BBCH 49/51 (Qualitätsgabe) zu sehen. Sofern die erste Gabe spät zu BBCH 29/31 appliziert wurde, konnten mit dieser einmaligen Applikation der gesamten N-Menge die Anforderungen für die Rohproteingehalte erfüllt werden. Sofern keine Zusatzvereinbarungen für erhöhte Rohproteingehalte verhandelt wurden, die diese auch honorieren, führen weitere Düngungsmaßnahmen nur zu erhöhten Kosten. Gerade die jährlichen Anpassungen der geforderten Rohproteingehalte seitens der Getreideerfasser, sprechen für eine betriebsindividuelle Vereinbarung dieses Qualitätskriteriums. Ebenfalls wichtig ist die Erkenntnis, dass vermehrt Frühsommertrockenheiten auftreten. Meist fällt die Gabe zum Ährenschieben in diese trockene Periode, was einerseits bereits den Transport des Düngers durch Niederschläge in die Krume verhindert und andererseits die N-Aufnahme der Pflanzen bedingt durch Trockenstress reduziert. Untersuchungen von DALLING et al. (1975), AUSTIN et al. 1977, HEITHOLDT et al. 1990, PALTA und FILLERY, 1995, KICHEY et al. 2007 sowie DUPONT und ALTENBACH (2003) zeigten zudem, dass die Translokation von N während der Kornfüllung eine wichtigere N-Quelle ist, als die N-Aufnahme durch die Wurzeln. Die Ergebnisse der hier durchgeführten Experimente zeigen sowohl einen Anstieg der N-Konzentrationen in der Pflanzenmasse nach hohen applizierten N-Mengen, deuten aber auch auf eine N-Umverlagerung während des weiteren Wachstums hin. Hohe Mengen an N, die gabenreduziert im Stadium des Schossens appliziert werden, unterliegen einerseits nicht solch hohen Temperaturen wie zum Zeitpunkt des Ährenschiebens (gasförmige N-Verluste) und andererseits können diese potentiell eher durch auftretende Niederschläge in die Krume „eingewaschen“ werden. Die möglichen negativen Folgen einer frühen N-Gabe, sowie die möglichen Verluste und reduzierten N-Effizienzen von späten N-Gaben (BBCH 49/51) untermauern eine stark betonte Düngung zum Zeitpunkt des Schossens (BBCH 29/31). Vorhandene Niederschläge, milde Temperaturen und hohe N-Aufnahmeraten plädieren zudem für diesen Applikationszeitpunkt und werden durch die Ergebnisse der Experimente nachgewiesen. Demgegenüber steht ein erhöhtes Infektionsrisiko von pilzlichen Erregern wie, z.B., *Erysiphe graminis* (JENSEN und MUNK 1997; TOMPKINS et al. 1992; OLESEN et al. 2003). Unsere Versuche zeigten diesbezüglich keine

Unterschiede zwischen den Düngeverfahren; es bedarf dazu aber weiterer Untersuchungen mit mehreren Sorten und unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen.

Die heutigen Sorten zeigen den Ergebnissen zufolge eine hohe Plastizität hinsichtlich der Ausprägung der Ertragskomponenten. Je nach Umweltbedingungen, worunter auch im weiteren Sinne, die N-Versorgung zu sehen ist, wird eine Ertragskomponente stärker oder schwächer ausgebildet. Dies zeigen die Ergebnisse deutlich. In Jahren mit einer hohen Bestandesdichte wie, z.B., die Vegetationsperiode 2011/12 reagierten alle Sorten mit einer reduzierten Anzahl an Körner Ähre⁻¹. Eine Erhöhung der Bestandesdichte durch eine frühe Düngung im Frühjahr 2012 war einerseits nicht notwendig und andererseits auch nicht möglich, da die Bestände unabhängig von den Sorteneigenschaften bereits eine sehr hohe Bestandesdichte erreicht hatten. Grund hierfür war die anhaltende Vorwinterentwicklung (milde Temperaturen) im Jahr 2011. Somit zeigten sich in der Vegetationsperiode 2011/12 über alle Sorten hinweg einheitlich dichte Bestände mit einer geringen Anzahl an Körnern Ähre⁻¹. In der Vegetationsperiode 2010/11 konnten jedoch mit frühen N-Gaben höhere Bestandesdichten erreicht werden. Im Gegensatz zu älteren Ergebnissen (Alcoz et al. 1993; HAMID 1972) führten die in unseren Experimenten erreichten hohen Bestandesdichten zu keinen höheren Kornträgen, jedoch zu einer geringeren Anzahl an Körnern Ähre⁻¹. Diese Ergebnisse zeigen einerseits das Kompensationsvermögen moderner Winterweizensorten, andererseits auch der bereits untersuchte Effekt von Reduktionsprozessen, die von einer zu hohen Düngung zum Stadium des Bestockens verursacht werden. Der große Einfluss der Witterung wird ausführlich unter Punkt 3.3 behandelt.

3.2 Einfluss der Standorteigenschaften und des N- Nachlieferungspotentials

Ebenfalls großen Einfluss auf das Funktionieren von gabenreduzierten N-Düngeverfahren hat das N-Nachlieferungspotential des Standorts. Dazu wurden gesonderte Versuche (Experiment 1 und 2) auf zwei Vergleichsflächen (Kapitel 3) angelegt. Den Ergebnissen zufolge hat das N-Nachlieferungspotential großen Einfluss auf das Funktionieren von gabenreduzierten N-Düngeverfahren, da ausgelassene Düngetermine über den bodeneigenen N-Pool ausgeglichen werden können. Offen ist jedoch, wie hoch ein N-Nachlieferungspotential sein muss, damit gabenreduzierte N-Düngeverfahren funktionieren. Diese Frage stellt sich gerade auf den Standorten mit hoher Bodengüte. Die Untersuchungen

der Sorteneigenschaften (3.1) fanden auf einer Parabraunerde (ca. 75 BP) mit einem sehr geringen N-Nachlieferungspotential statt. Dennoch zeigten die gabenreduzierten Verfahren mit KAS und AHL vergleichbare Ergebnisse. Um generell Aussagen über die Höhe eines N-Nachlieferungspotentials treffen zu können, wurden in den hier durchgeführten Versuchen einerseits Bracheparzellen und andererseits mit N-ungedüngte Kontrollen angelegt. Beide Maßnahmen eigneten sich dazu, das N-Nachlieferungspotential zu erfassen. Grundsätzlich zeigten sich große Unterschiede im N-Nachlieferungspotential, jedoch funktionierten die gabenreduzierten N-Düngeverfahren in beiden Experimenten. Das sehr hohe N-Nachlieferungspotential von Experiment 1 war nicht notwendig, um ausgelassene Düngetermine der gabenreduzierten N-Düngeverfahren zu kompensieren.

In Anlehnung an die Ergebnisse von FISCHBECK et al. 1990 und MAIDL et al. 1998 ist anzunehmen, dass ein hohes Mineralisationspotential (Experiment 1) in Verbindung mit einer frühen Düngung kontraproduktiv ist und Reduktionsprozesse fördert. Indizien dafür sind auch die höheren N_{\min} -Gehalte von Experiment 1 zu Vegetationsbeginn sowie die gerade in den frühen Varianten von Experiment 1 geringeren Kornerträge im Jahr 2011. Die N-Düngebedarfsprognose wurde anhand der Düngeverordnung sowie den speziellen Regularien des Landes Baden-Württemberg berechnet. Den Ergebnissen zufolge eignet sich diese für die Berechnung des Düngebedarfs in der Praxis. Eine repräsentative Abschätzung des Mineralisationspotentials solcher Standorte ist mit dieser N-Düngerbedarfsprognose jedoch nur bedingt möglich, da diese nur auf einer Zeitpunktaufnahme (N_{\min} zu Vegetationsbeginn) und nicht auf einem Verlauf der Mineralisation basiert. Mögliche Hilfsmittel wären z.B. der Yara N-Tester. Mit diesen könnte der N-Versorgungsstatus der Pflanze zeitnah vor der Düngung erfasst werden und so die Mineralisation des Standorts besser in die zu applizierende N-Menge mit einbezogen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass gabenreduzierte Düngeverfahren auf tiefgründigen Standorten auch ohne langjährige Düngung mit Wirtschaftsdünger geeignet sind, um hohe Erträge und Rohproteingehalte zu erzeugen. Zu erwähnen ist jedoch, dass auch die organische Substanz von Experiment 2 ein eher enges C/N Verhältnis (9,0) aufweist. In Anbetracht dessen sind auch in Experiment 2 eher hohe Mineralisationsraten zu erwarten.

Solche Standorte in Verbindung mit den kompensationsfähigen Sorten zeigen die Fähigkeit, große Mengen an appliziertem N aufzunehmen und den Pflanzen über eine lange Zeit zur Verfügung zu stellen. Dazu nehmen die Pflanzen große Mengen an N auf und sind in der

Lage, diesen zu späteren Zeiten wieder in der Pflanze umzuverlagern. Eine hohe N Remobilisations-Effizienz bei Weizen wurde bereits durch ZHEN-YUAN et al. 1996 mittels Isotopenversuche sowie KICHEY et al. 2007 dargelegt.

Unbestritten sind die positiven Effekte einer organischen Düngung im Hinblick auf die, z.B., bodenphysikalischen Eigenschaften. Ebenfalls zeigen viele Untersuchungen die als positiv anzusehenden Auswirkungen auf bodenbiologische Eigenschaften (KANDELER et al. 1999a; KANDELER et al. 1999b; MARSCHNER et al. 2003; KIRCHMANN et al. 2004; BITTMANN et al. 2005). In den hier durchgeführten Versuchen konnten jedoch keine Vorteile durch die langjährige Applikation von Wirtschaftsdünger und das dadurch deutlich höhere N-Nachlieferungspotential beobachtet werden. Zudem besteht die Gefahr, dass N, welcher nicht repräsentativ in die Düngebedarfsprognose einbezogen werden kann und somit nicht der Aufnahme durch die Pflanzen unterliegt, durch unterschiedliche Verlustpfade entweichen kann (DILZ et al. 1990; KLAUSNER et al. 1994; PAUL and ZEBARTH 1997; BECKWITH et al. 1998; CARPENTER et al. 1998; ROCHETTE et al. 2000; HAO et al. 2003; WEBB et al. 2004; DAMBREVILLE et al. 2006; HAROLD et al. 2006; HABTESELASSI et al. 2006; HJORTH et al, 2010).

3.3 Einfluss der Witterung

FISCHBECK et al. 1990, ALCOZ et al. 1993 sowie MAIDL et al. 1996 definierten die Witterung als größte Variable im Hinblick auf die Ertragsbildung gefolgt von der absoluten, an den Standort angepasste N-Menge. Die Gabenverteilung und die Ausbringungstechnik rücken in dieser Hinsicht in den Hintergrund. Dies konnte anhand der durchgeführten Versuche bestätigt werden. Ein Beispiel dafür ist die Vorwinterentwicklung in der Vegetationsperiode 2011/12. Die Bestände zeigten ein nahezu dauerhaftes Wachstum bis Mitte Dezember 2011. Dies führte zu stark bestockten Beständen im Frühjahr 2012. Die Zielsetzung der ersten Gabe zu Vegetationsbeginn (Erhöhung der Bestandesdichte) konnte demnach nicht erreicht werden, vielmehr war diese aufgrund der erwähnten Entwicklung nicht notwendig. Die Bestände entwickelten sich demnach nach der Aussaat nur mittels Nachernte N_{min} . Besonders interessant ist, dass dies sowohl auf der Fläche mit der Vorfrucht Silomais als auch auf der Fläche mit der Vorfrucht Winterweizen zu beobachten war. Ein weiteres Beispiel für den maßgeblichen Einfluss der Witterung auf die Ertragsbildung sind die deutlichen Unterschiede in der Ausbildung der Tausendkornmasse des Jahres 2011 und

2012. Im Hinblick auf die Witterung sind weiter vermehrt die Monate März und April als vorteilhaft für die Düngung anzusehen. In diesen Monaten sind meist ausreichende Niederschläge vorhanden, sodass applizierter N zunächst in die oberste Krume transportiert und schließlich mit ausreichender Bodenfeuchte durch die Pflanze aufgenommen werden kann. Dieser aufgenommene N steht nun der Pflanze zur Verfügung und kann je nach Entwicklungsstadium in der Pflanze umverlagert werden. Gerade die Düngungsverfahren bei denen KAS einmalig zum Schossen (BBCH 29/31) appliziert worden ist, zeigen das Funktionieren und diesen Effekt anschaulich durch hohe Erträge und Rohproteingehalte. Die bereits erwähnten vermehrt auftretenden Vorsommertrockenheiten (Mai-Juni) verdeutlichen die Notwendigkeit von Düngungsverfahren, die gerade die Zeit mit ausreichenden Niederschlägen (März-April) für die Applikation nutzen. Zwar zeigten die Ergebnisse ein Funktionieren von gabenreduzierten Düngungsverfahren mit KAS und AHL, jedoch erbrachte die AHL Variante im Jahr 2011 und Experiment 2 signifikant geringere Kornerträge als die Variante 3xKAS oder 1xKAS spät. Im Gegensatz zum Versuchsjahr 2012 zeigte sich im Versuchsjahr 2011 während der Ausbringung zu BBCH 29/31 eine trockene warme Witterung. Gerade aus einer oberflächigen Ablage von Ammonium oder Harnstoff betonten Düngern resultiert im Vergleich zu der Einarbeitung von diesen Düngern ein erhöhtes Verlustpotential über Ammoniak (NH_3). Was diese Vermutung ebenfalls noch bestätigt, sind die vorzufinden pH-Werte des Standorts (BOUWMEESTER et al. 1985; WEBER et al. 2000; KHALIL et al. 2005). Auch einschränkend müssen Düngungsverfahren mit einer Applikation zu frühen Stadien (BBCH 25) angesehen werden. Diese zeigen zwar hohe Erträge, aber es besteht die Gefahr, dass N gerade nach Starkniederschlägen von der Oberfläche abgetragen bzw. auf flachgründigen Standorten in die Tiefe verlagert wird. Werden solch hohe N-Mengen zu späteren Stadien (BBCH 29/31, Beginn Massenwachstum) appliziert, steht demgegenüber zumindest eine hohe tägliche N-Aufnahme der Pflanzen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist im Hinblick auf die Witterung das erwähnte N-Nachlieferungspotential. Die Temperatur und die Bodenfeuchte haben maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Mineralisation und sind deshalb sehr wichtig für die Einbeziehung des N-Nachlieferungspotentials in die Düngebedarfsprognose.

3.4 Grenzen und Risiken gabenreduzierten N-Düngeverfahren

Die gesamten Praxis- als auch die Exaktversuche dieser Arbeit fanden auf tiefgründigen Parabraunerden statt. Die Eigenschaften solcher Standorte sind eine hohe nutzbare Feldkapazität, geringe Sickerwasserraten sowie ein hohes Potential der N-Nachlieferung, insbesondere wenn die Flächen langjährig mit organischen Düngern versorgt wurden. Auf diesen Standorten können gerade in Gemischtbetrieben uneingeschränkt gabenreduzierte N-Düngeverfahren empfohlen werden. Eine Tiefenverlagerung innerhalb der Vegetationsperiode ist auf solchen Standorten als sehr unwahrscheinlich anzusehen, da sehr hohe Niederschlagsmengen benötigt werden um eine Tiefenverlagerung innerhalb der Vegetationsperiode in Gang zu setzen. Bei leichten oder flachgründigen Standorten stellt sich dies anders dar. Bezüglich der Bodeneigenschaften sind diese Standorte jedoch differenziert zu betrachten. Leichte Standorte hinsichtlich der Bodenart sind z.B. Sandstandorte. Solche Standorte zeigen eine geringe Wasserhaltefähigkeit sowie hohe Sickerwasserraten. Diese Standorte können zudem grundwassernah existieren, sodass eine N-Verlagerung unmittelbar Einfluss auf die Grundwasserqualität nimmt. Weiter sind, z.B., Parabraunerden auf Mergel, Kies oder Schotter zu erwähnen. Solche Standorte zeigen auch geringe Wasserhaltefähigkeiten und sehr hohe Sickerwasserraten. Als Beispiel kann hier das Illertal erwähnt werden. Unter dem maximal 30 cm mächtigen Ap-Horizont ist reiner Kies mit hohen pH-Werten (>7) zu finden. Unter solchen Bedingungen sind einerseits kaum Wurzeln zu finden und andererseits ist dort bezüglich des Verlagerungspotentials eine freie Drainage anzunehmen. Zuletzt sind flachgründige Standorte zu erwähnen, unter denen sich Fels befindet. Nach einer relativ schnellen Tiefenverlagerung ist auch die laterale Verlagerung möglich. Zusammenhängend können gabenreduzierte N-Düngeverfahren auf solchen Standorten nur eingeschränkt empfohlen werden. Das Risiko einer Verlagerung nach starken Niederschlägen in jeglicher Hinsicht ist als zu hoch anzusehen. Maßnahmen wie eine Teilung der N-Gaben aber auch dem Auslassen früher Düngungstermine sind hinsichtlich des Risikos einer N-Verlagerung als wirkungsvoll anzusehen. Bei späten Düngungsterminen, z.B., zum Schossen (BBCH 29/31) ist eine höhere N-Aufnahmerate, verursacht durch höhere Biomassezuwächse, zu erwarten. Die täglich akkumulierte N-Menge ist somit höher und damit sinkt das Risiko einer Tiefenverlagerung oder eines oberflächigen Abtrags.

4 Zusammenfassung

Die in bis zu vier Teilgaben aufgeteilte N-Düngung mit Kalkammonsalpeter (KAS) zu Winterweizen galt in der Vergangenheit als Düngeverfahren für die optimale N-Versorgung von Winterweizen und steht auch noch heute als Garant für das Erreichen von Ertrags- und Qualitätszielen. Ebenso wird damit das Ziel verfolgt, den N-Bedarf der Pflanzen mit dem Gehalt an N im Boden zu synchronisieren bzw. zu harmonisieren.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, gabenreduzierte N-Düngeverfahren mit KAS hinsichtlich dem Erreichen von Ertrags- und Qualitätszielen zu untersuchen sowie die Notwendigkeit geteilter N-Gaben zu überprüfen.

Anlass dazu gaben Praxisversuche mit modernen Winterweizensorten, die bereits ein Funktionieren von gabenreduzierten N-Düngeverfahren darlegten.

In verschiedenen Feldversuchen wurden der Einfluss von modernen Winterweizensorten, dem N-Nachlieferungspotential des Standorts sowie der Witterung untersucht. Anhand dieser Ergebnisse wurden zudem die Grenzen sowie mögliche Risiken von gabenreduzierten N-Düngeverfahren abgeleitet. Referenz war die dreigeteilte N-Düngung mit KAS.

Gabenreduzierte N-Düngeverfahren mit KAS eignen sich zum Erreichen von Ertrags- und Qualitätszielen im Winterweizenanbau, sofern das N-Düngeniveau ausreichend ist. Eine geteilte N-Düngung, wie diese weit verbreitet noch praktiziert wird, ist demnach nicht notwendig. Auch eignen sich gabenreduzierte N-Düngeverfahren mit Ammonium-Nitrat-Harnstoff-Lösung (AHL), jedoch bedarf es hier weiterer Untersuchungen hinsichtlich der optimalen Ausbringungstechnik im Hinblick auf die Minimierung von NH_3 Emissionen.

Als ein maßgeblicher Grund für das Gelingen gabenreduzierter N-Düngeverfahren mit KAS wurden die Eigenschaften moderner Winterweizensorten in den hier zugrunde liegenden Untersuchungen angesehen.

Moderne Winterweizensorten verfügen über geringe Harvest-Indizes, was zu einem geringeren Risiko von Lagergetreide führt. Weiter verfügen die Winterweizensorten über ein hohes Potential zur N-Umverlagerung. Dieses Potential führt dazu, dass hohe N-Mengen in physiologisch wichtigen Stadien in Verbindung mit guten Wachstumsbedingungen z.B. BBCH 29/31 aufgenommen werden und schließlich in der Pflanze umverlagert werden können. Weiter zeigen die getesteten Winterweizensorten eine hohe Plastizität bezüglich der Ausprägung ihrer Ertragskomponenten. Suboptimale Bedingungen während der Ausprägung

einer Ertragskomponente, werden durch die Ausprägung einer anderen Ertragskomponente kompensiert. Nicht optimal bestockte Bestände zeigen eine Zunahme an Körner Ähre⁻¹. Sehr dicht bestockte Bestände zeigen wiederum eine stark reduzierte Anzahl an Körner Ähre⁻¹. Winterweizen „kompensiert“ demnach auch eine zu hohe Bestandesdichte, womöglich begründet durch ein zu hohes N-Angebot, durch die Reduktion der Anzahl an Körnern Ähre⁻¹. Diese Eigenschaften plädieren für den Düngungstermin zu BBCH 29/31, und im Hinblick auf die Reduktionsprozesse während der Bestockung ist dies als passender N-Düngetermin für hohe N-Mengen anzusehen. Die Zunahme der Vorsommertrockenheiten sowie die Fähigkeit zur Umverlagerung von N geben zudem grundsätzlich Anlass, den N-Düngetermin zu BBCH 49/51 in Frage zu stellen.

Gabenreduzierte N-Düngeverfahren sind nicht nur auf Standorten mit hohen N-Nachlieferungspotentialen, wie dieses auf Betrieben mit einer langjährigen Wirtschaftsdüngerapplikation zu finden ist, geeignet. Das bodeneigene N-Nachlieferungspotential auf den getesteten Parabraunerden ohne langjährige Wirtschaftsdüngerapplikation, in Verbindung mit den weiteren sehr positiven Eigenschaften solcher Standorte, begünstigt demnach die Anwendung von gabenreduzierten N-Düngeverfahren mit KAS. Ein hohes N-Nachlieferungspotential bedingt durch eine langjährige Düngung mit Wirtschaftsdünger ist in dieser Hinsicht eher als kritisch anzusehen und kann zu Überschüssen in der N-Bilanz und den damit verbundenen Umweltproblemen führen. Unabhängig davon sind Maßnahmen mit organischen Düngern wie, z.B., festen Wirtschaftsdüngern als positiv für bodenphysikalische und bodenbiologische Eigenschaften anzusehen. Für die Einbeziehung in die Düngebedarfsprognose bedarf es jedoch Methoden und Berechnungsverfahren, die die Mineralisationsdynamik besser quantifizieren um den erwähnten Risiken entgegenzuwirken.

Mit der gabenreduzierten N-Düngung mit KAS können Betriebe mit anderen Schwerpunkten arbeitswirtschaftliche Vorteile realisieren und auf bewährte Düngemittel zurückgreifen. Dem Effekt der eingesparten Feldarbeitszeit stehen dann zudem Vorteile in der Durchführung anderer betrieblicher Tätigkeiten, die unter Umständen ökonomisch bedeutender sind, gegenüber.

Für flachgründige oder sehr leichte Standorte mit einer geringen nutzbaren Feldkapazität und hohen Sickerwasserraten bedarf es weiterer Untersuchungen. Zwar sind dort die N-Mengen, die gabenreduziert ausgebracht werden, aufgrund des niedrigeren

Ertragspotentials meist geringer, jedoch wird bereits mit geringeren Niederschlagsmengen eine Tiefenverlagerung in Gang gesetzt.

Neben diesen Einflussfaktoren stellt die Witterung den größten Faktor für die Determinierung von Ertrag und Qualität dar. Gerade auch die vermehrt zu beobachtende milde Vorwinterwitterung führt zu längeren Vegetationsperioden und somit zu weiter entwickelten Beständen. Solche Effekte führen dazu, dass N-Gaben zu Vegetationsbeginn mit dem Ziel einer Erhöhung der Bestandesdichte nicht zielführend bzw. notwendig sind. Ebenso zeigten sich enorme Unterschiede in der Ausbildung der Tausendkornmasse, die alleinig auf den Jahreseffekt und somit auf die Witterung zurückzuführen sind.

Die definierten Einflussfaktoren (Sorteneigenschaften, Standorteigenschaften, Witterungseinfluss) sowie die Grenzen von gabenreduzierten N-Düngeverfahren zeigen anschaulich wie komplex die N-Düngung ist und wie unterschiedlich die Witterung Einfluss auf die Bestandsentwicklung sowie die Ertragsbildung nimmt. Standardmaßnahmen wie die etablierte dreigeteilte N-Düngung mit KAS sind in diesem Zusammenhang nicht falsch, jedoch als nicht notwendig bzw. nicht optimal anzusehen. Mit Fachwissen und der Beobachtung der Witterung sowie der Bestandsentwicklung in Verbindung mit einer Düngebedarfsprognose und dem standorttypischen Ertragspotential kann die Düngung durch den Ansatz einer gabenreduzierten N-Düngung mit KAS maßgeblich optimiert werden.

5 Summary

The split N-fertilization with CAN in three or four doses was considered a measure to improve the nitrogen supply of winter wheat in the past and still is considered a guarantor for good yield and quality. The split N-fertilization with CAN is also recommended to synchronize and harmonize N-demand of the plants as well as soil N-content.

The aim of the current study was to analyze simplified (reduced number of N-servings) CAN strategies to winter wheat and the necessity of split nitrogen servings in order to achieve yield and quality aims. This interest was occasioned by impressive results of experiments on farmers' fields using simplified N- strategies with CAN.

Simplified CAN fertilization strategies are able to produce high grain yield and protein contents with winter wheat when the N-supply is ensured. Therefore, the common split N-servings with CAN are not necessary. Simplified strategies with UAN seem to be possible, but this requires further research on application techniques to reduce NH_3 losses. Simplified CAN fertilization strategies were tested based on modern wheat varieties and the high plasticity in the development of the yield compounds. Modern wheat varieties show low harvest-indices which is important to reduce the risk of lodging. Furthermore, these varieties are able to overcome omitted N-servings through remobilization of N in the plants. Suboptimal conditions during the development within one important growing stage can be compensated during later growing stages when the growing conditions are better. These properties in combination with a late first application (BBCH 29/31) of N turned out to be the "gold standard" in our experiments. Reduction processes during the tillering (BBCH 25/27) period when N is applied confirm these findings. In addition, the application date for the heading stages (BBCH 49/51) when temperatures are high and conditions very dry have to be considered.

Simplified N-fertilization systems can also be applied on Luvisols if the soils are not long-term fertilized by liquid manure. The positive soil characteristics of these soils and the high soil-borne fertility support the approach with simplified CAN strategies. In this situation, N-leaching into deeper soil layers is not likely as high precipitation rates in a short time would be necessary to cause this. In fact, a long term liquid manure application with high rates is not necessary when simplified CAN treatments are applied. Moreover, high N amounts in

soils caused by long term liquid manure applications are a risk for N-losses and environmental pollution.

Notwithstanding the above, organic fertilizers like liquid manure show positive effects on the soil chemistry and the physical properties of the soil. It is important to apply a system to better include the N fertilization effect of liquid manure during the vegetation period.

Additionally, simplified CAN fertilization reduces the work effort on the farms. Currently, especially for livestock farms, which rely on N-fertilization, simplified CAN treatments are a good alternative to the common practice.

Whereupon on shallow or sandy soils the approach with simplified CAN treatments should be restricted since these soils mostly show low water holding capacities and high percolate water rates. Under suboptimal growing conditions with high precipitation rates simplified CAN treatments can be a risk for the environment and the groundwater. Apart from that, the volatile weather conditions are the most important factor for yield and quality outcome. Mild conditions during the early winter lead to prolonged growing of the plants. In spring the number of tillers per m^{-2} is already determinated. Therefore, a combination of N doses at the beginning of the growing season in order to promote the number of tillers doesn't yield the aimed results.

The properties of modern wheat cultivars, tested soils, weather conditions and constraints of simplified CAN treatments show the complexity of N fertilization of winter wheat. Standard measures like the common split CAN fertilization are neither wrong nor ideal to create high yield and protein contents with a minimum of input. The most important items for a successful wheat production are high knowledge and attention levels for the plants and growing conditions. Combining the fertilizer requirement calculation and the knowledge on the field yield potential, the yield and quality of winter wheat can be optimized with a minimum of input.

6 Literaturverzeichnis

- ALCOZ, M. M., HONS, F. M., HABY, V.A. (1993)
Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. *Agronomy Journal* 85 (6), 1198-1203.
- AUSTIN, R. B., and JONES, H.G., (1975)
The physiology of wheat, Pages 20-73 in Report of the Plant Breeding Institut. Cambridge, for 1974
- AUSTIN, R. B., FORD, M.A., EDRICH, J. A., BLACKWELL, R. D. (1977)
The nitrogen economy of winter wheat. *Journal of Agricultural Science* 88, 159-167.
- AUSTIN, R. B., BINGHAM, J., BLACKWELL, R. D., EVANS, L. T., FORD, M. A., MORGAN, C. L. and TAYLOR, M. (1980). Genetic improvements in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 94, 675-689.
- BAEUMER, K. (1992)
Allgemeiner Pflanzenbau, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- BARBOTTIN, A., LECOMTE, C., BOUCHARD, C., JEUFFROY, M. H. (2005)
Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: genotypic and environment effects. *Crop Sci.* 45, 1141–1150.
- BARNABÁS, B., JÄGER, K., FEHÉR, A., (2008)
The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant Cell Environ.* 31, 11–38.
- BUNDESSORTENAMT (2017)
Beschreibende Sortenliste 2013-2017 - Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Bundessortenamt, Hannover, 288 pp.
Sowie Auszüge aus der Beschreibenden Sortenliste 1972
- BOUWMEESTER, R.J.B., VLEK, P.L.G., & STUMPE, J.M. (1985)
Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. *Soil Science Society of America Journal*, 49, 376–381.
- BRIGGLE, L.W., und REITZ, L.P., (1963)
Classification of triticum species and of wheat varieties grown in the United States, US Dept. of. Agr. Bull. 1278
- BROUWER, W. (1972)
Handbuch des Speziellen Pflanzenbaus. Verlag P.Parey, Hamburg und Berlin.
- CAKMAK, D., BLAGOJEVIC, S., STEVANOVIC, D., JAKOVljeVIC, M., MRVIC, V. (2013)
Effect of sulphur fertilization on wheat yield and on nutrient grain content on chernozem in serbia. *Agrochimica*, 46, 57–69.

- CALDERINE, D.F., and SLAFER, G.A., (1998)
Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Research* 57. 335-347.
- DALLING, M. J, HALLORAN, G. M, WILSON, J. H., (1975)
The relation between nitrate reductase and grain nitrogen production in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 26: 1-10.
- DUPONT, F. M., ALTENBACH, S. B. (2003):
Molecular and biochemical impacts of environmental factors on wheat grain development and protein synthesis. *J. Cereal Sci.* 38, 133–146.
- FAOSTAT (2017)
<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>, Download vom 15.08.2017
- FOX, R. H., KERN, J. M. & PIEKIELEK, W. P. (1986)
Nitrogen fertilizer source, and method and time of application effects on no-till corn yields and nitrogen uptakes. *Agronomy Journal* 78, 741-746.
- FREYER, B., (2003)
Stellung der Kulturen in der Fruchtfolge, in *Fruchtfolgen, Konventionell, Integriert, Biologisch*, S. 46, S47., Verlag Eugen Ulmer Stuttgart
- GABRIEL, D., PFITZNER, C., HAASE, N., HÜSKEN, A., PRÜFER, H., GREEF, JÖ. MICHAEL., RÜHL, G., (2017)
New strategies for a reliable assessment of baking quality of wheat – Rethinking the current indicator protein content, *Journal of Cereal Science* (2017), doi: 10.1016/j.jcs.2017.08.002.
- GATE, P., (2007)
Le ble face au changement climatique. *Perspectives Agricoles* 336, 20-56
- GERVOIS, S., CIAIS, P., de NOBLET-DUCOUDRE, N., BRISSON, N., VUICHARD, N., VIOVY, N., (2008)
Carbon and water balance of European croplands throughout the 20th century, *Global Biogeochemical Cycles* 22, 13-19
- GERWING, J. R., CALDWELL, A.C. and GODDROAD, L. L. (1979)
Fertilizer nitrogen distribution under irrigation between soil, plant, and aquifer. *Journal of Environmental Quality* 8, 281–284.
- GLIEMROTH, G. und KÜBLER, E., (1972)
Untersuchungen an unterschiedlich getreidestarken Fruchtfolgen auf fünf Standorten, Teil 1: Ertragsverlauf von Getreidearten, in: *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau*, 136, S. 34-54

- GOLBA, J., ROZBICKI, J., GOZDOWSKI, D., SAS, D., MAŁDY, W., PIECHOCIŃSKI, M., KURZYŃSKA, L., STUDNICKI, M., DEREJKO, A., (2013)
Adjusting yield components under different levels of N applications in winter wheat. *International Journal of Plant Production* 7 (1), 139-150.
- GOODING, M.J., and DAVIES, P.D. (1997)
Wheat Production and Utilization, Systems, Quality and the Environment, CAB International, Wallingford, UK, p. 335.
- GOODING, M.J., Ellis, R.H., SHEWRY, P.R., SCHAFIELD, J.D., (2003)
Effects of restricted water availability and increased temperature on the grain filling, drying and quality of winter wheat, *Journal of Cereal Science* 37, 295-309.
- HAMID, A., (1972)
Efficiency of N uptake by wheat as affected by time and rate of application, using N-labelled ammonium sulphate and sodium nitrate. *Plant and Soil* 37, 389-394.
- HAUMANN, G., und DIETSCH, H., (2000)
Halm und Körnerfrüchte, In *Lehrbuch des Pflanzenbaus*, Band 2 Kulturpflanzen, Seite 259-264, S. 277, S. 279, S. 303, Hrsg. Norbert Lüttke Entrup und Jobst Oehmichen, Verlag Th. Mann 2000
- HARTMAN, M. D. & NYBORG, M. (1989)
Effect of early growing season moisture stress on barley utilization of broadcast-incorporated and deep-banded urea. *Canadian Journal of Soil Science* 69, 381-389.
- HEITHOLT, J.J., CROY, L.I., MANESS, N.O., NGUYEN, H.T., (1990)
Nitrogen partitioning in genotypes of winter wheat differing in kernel N concentration. *Field Crops Research* 23, 133–144.
- HOFFMANN, W., MUDRA, A., PLARRE, W., (1985)
Lehrbuch der Züchtung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Band 2: Spezieller Teil. Sonderheft 2. Verlag P.Pary Hamburg und Berlin
- JÄRVAN, M, EDESI L, ADAMSON, A. (2012)
Effect of sulphur fertilization on grain yield and yield components of winter wheat. *Acta Agriculturae Scandinavica (Section B - Soil & Plant Science)*, 62, 401–409.
- JOHNSON JA, KHAN MNA and SANCHEZ CRS (1972)
Wheat cultivars, environment and bread-baking quality. *Cereal Sci Today* 17:323–326.
- JOHANSSON E and SVENSSON G (1998)
Variation in bread-making quality: effects of weather parameters on protein concentration and quality in some Swedish wheat cultivars grown during the period 1975–1996. *J Sci Food Agric* 78:109–118

- KHALIL, M.I., SCHMIDHALTER, U., & GUTSER, R. (2005)
Ureasupergranules in a cambisol: N transformations, N₂O and NH₃ emissions at two soil water regimes. In C. J. Li et al. (Eds.), *Plant nutrition for food security, human health and environmental protection* (pp. 1122–1123). China: Tsinghua University Press.
- KANWAR, R. S., BAKER, J. L. and BAKER, D. G. (1988)
Tillage and split N-fertilization effects on subsurface drainage water quality and crop yields. *Transactions of the ASAE* 31 (2), 453-461.
- KICHEY, T., HIREL, B., HEUMEZ, E., DUBOIS, F., Le GOUIS, J., (2007)
In winter wheat (*Triticum aestivum* L.), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlate with agronomic traits and nitrogen physiological markers.
Field Crop. Res. 102, 22–32.
- KLAPP, E., (1967)
Lehrbuch des Acker- und Pflanzenbaus. Verlag P. Parey, Hamburg und Berlin
- KOCH, H.-J., PRINGAS, C., MAERLAENDER, B., (2006)
Evaluation of environmental and management effects on *Fusarium* head blight infection and deoxynivalenol concentration in the grain of winter wheat. *Eur. J. Agronomy* 24. 357-366
- LAMOND, R. E., DAVIED, M. A., GORDON, W. B. (1991)
Sulphur research in Kansas. *Sulphur in Agriculture*, 15, 24–27.
- LÓPEZ-BELLIDO, L., LOPEZ-BELLIDO, R., J. REDONDO, R., (2005)
Nitrogen efficiency in wheat under rainfed Mediterranean conditions as affected by split nitrogen application. *Field Crop Research* 94, 86-97.
- MAIDL, F. X., STICKSEL, E., RETZER, F. and FISCHBECK, G. (1998)
Effect of varied N-fertilization on yield formation of winter wheat under particular consideration of mainstems and tillers. *Journal of Agronomy and Crop Science* 180, 15-22.
- MALLORY, E.B. and GRIFFIN, T.S. (2007)
Impacts of soil amendment history on nitrogen availability from manure and fertilizer. *Soil Science Society of America Journal* 71, 964-973.
- MOSS, H. J.; RANDALL, P. J.; WRIGLEY, C. W. (1983)
Alteration to grain, flour and dough quality in three wheat types with variation in soil sulfur supply. *J. Cereal Sci.* 1983, 1, 255–264.
- MOTZO, R., GIUNTA, F., DEIDDA, M., (2004)
Wx expression of a tiller inhibitor gene in the progenies of interspecific crosses *T. aestivum* L. x *T. turgidum* subsp. *Durum*. *Field Crop Res.* 85, 15-20.

- MÜLLER, S., ANSORGE, H. & WEIGERT, I. (1991)
Einfluss der Stickstoffdüngung auf Ertrag, Ertragsstruktur und N-Verwertung von Winterweizen - Möglichkeiten und Grenzen der Bestandesführung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde 154, 115-119.
- STICKSEL, E., MAIDL, F.-X., RETZER, F., DENNERT, J., FISCHBECK, G., (2000)
Efficiency of grain production of winter wheat as affected by N fertilization under particular consideration of single culm sink size. European Journal of Agronomy 13, 287–294.
- PALTA, J.A., and FILLERY, I.R.P (1995)
N-application enhances remobilization and reduces losses of pre-anthesis N in wheat grown on a duplex soil. Aust. J. Agric. Res. 46, 519–531.
- PAPAKOSTA, D., and A. A. GAGIANAS, (1991)
Nitrogen and dry matter accumulation, remobilization, and losses for Mediterranean wheat during grain filling. Agronomy Journal 83, 864—870.
- PORTER, J.R., GAWITH, M., (1999)
Temperature and the growth and development of wheat: a review. European Journal of Agronomy 10, 23–36.
- PETERSEN CJ, GRAYBOSCH RA, SHELTON DR and BAENZIGER, PS (1998)
Baking quality of hard winter wheat: Response of cultivars to environment in the great plains. Euphytica 100:157–162 (1998).
- REINER, L. et al. (1992)
Weizen aktuell. DLG Verlag
- RENTEL, D., (2017)
Telefonische Mitteilung am 07.09.2017, Bundessortenamt Hannover, Osterfelddamm 80, 30627 Hannover, Telefon: 0511 9566-50
- SADRAS, V.O., (2007)
Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. Field Crops Research 100, 125–138.
- SAKAL R. (1995)
Soil sulphur deficiencies and crop responses to sulphur in Orissa, India. Sulphur in Agriculture, 19, 26–29.
- SINCLAIR, T. R., (1998)
Historical Changes in Harvest Index and Crop Nitrogen Accumulation Crop Science Volume 38, Number 3, 638-643

- SOMMER, K. (2005)
Fertilization With CULTAN: Physiologically, Ecologically, Economically Optimized Fertilization for Arable, Grassland, Vegetable Production, Ornamental Horticulture and Fruit Growing. Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen (in german)
- UHLEN, A-K., SAHLSTRØM, S., MAGNUS, E-M., FÆRGESTAD, E-M., DIESETH J-A., RINGLUND, K., (2004)
Influence of genotype and protein content on the baking quality of hearth bread
Journal of the Science of Food and Agriculture J Sci Food Agric 84:887–894
DOI: 10.1002/jsfa.1797
- VARSHNEY, P., KANWAR, R. S., BAKER, J. L. and ANDERSON, C. E. (1993)
Tillage and nitrogen management effects on nitrate-nitrogen in the soil profile.
Transactions of the ASAE 36(3), 783-789.
- VOLLMER, F.J. (1986)
Weizen . In: Oehmichen, J: Pflanzenproduktion. Band 2: Produktionstechnik Verlag P.Parey, Hamburg und Berlin, S 224-278
- WAALWIJK, C., KASTELEIN, P., de Vries, I., KERENYI, Z., VAN DER LEE, T., HESSELINK, T., KÖHL, J., KEMA, G., (2003)
Major changes in *Fusarium* spp. In wheat in the Netherlands. Eur. J. Plant Pathologie, 109, 743-754
- WEBER, A., GUTSER, R., & SCHMIDHALTER, U. (2001)
Field emissions of NH₃ and NO_x following urea application to wheat. In W.J. Horst et al. (Eds.), Plant nutrition – food security and sustainability of agro-ecosystems (pp. 884–885). The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- WIESER, H.; GUTSER, R.; VON TUCHER, S. (2004)
Influence of sulphur fertilization on quantities and proportions of gluten protein types in wheat flour. J. Cereal Sci. 2004, 40, 239–244.
- WITHERS, P.J.A.; TYTHERLEIGH, A.R.J.; O'DONNELL, F.M. (1995)
Effect of sulphur fertilizers on the grain yield and sulphur content of cereals. J. Agric. Sci. 1995, 125, 317–324.
- XU, Z.Z., YU, Z.W., WANG, D., ZHANG, Y.L., (2005),
Nitrogen Accumulation and Translocation for Winter Wheat under Different Irrigation Regimes, Journal of Agronomy & Crop Science 191, 439–449
- YANG, J., SEARS, R.G., GILL, B.S., PAULSEN, G.M., (2002)
Genotypic differences in utilization of assimilate sources during maturation of wheat under chronic heat and heat shock stresses. Euphytica 125, 179–188.
- ZADOKS, J. C., CHANG, T. T. and KONZAK, C. F. (1974)
A decimal code for the growth stages of cereals. Weed Research 14, 415-421

- ZAMAN, M., MATSUSHIMA, M., CHANG, S. X., INUBUSHI, K., NGUYEN, L., GOTO, S., KANEKO, F., YONEYAMA, T., (2004)
Nitrogen mineralization, N₂O production and soil microbiological properties as affected by long-term applications of sewage sludge composts,
Biology and Fertility of Soils 40, 101–109, DOI 10.1007/s00374-004-0746-2
- ZHEN-YUAN, S., HAN, B.W., LIU, S.L., WANG, H.F., GAO, R.F., (1996)
Absorption and redis-tribution of nitrogen during grain-filling period of wheat and their regulationby 6-benzylaminopurine. *Acta Phytophysiol. Sin.* 22, 258–264.

Publikationsliste

1. **Is it necessary to split nitrogen fertilization for winter wheat? - On farm research on Luvisols in South-West Germany.**
Acceptet 21. März 2014, Journal of Agricultural Science (2015), 153, 575–587.
2. **Simplified N fertilization strategies to winter wheat.**
Part 1: Plants: Compensation capacity of modern wheat varieties
Submitted 02.11.2018 beim Journal „ *Archives of Agronomy and Soil Science* “
3. **Simplified N fertilization strategies to winter wheat. Part 2, Soils: N-mineralization potential affected by long-term cattle manure application**
Submitted 02.11.2018 beim Journal „ *Archives of Agronomy and Soil Science* “

Liste aller Beiträge zu Tagungen und Fachzeitschriften

Nr. 1. 2011

Titel: Ist eine Aufteilung der Stickstoffdüngung für hohe Erträge und Qualitäten bei Winterweizen notwendig? Exaktversuche in Südwestdeutschland.
Autoren: Makary, T., Hubert, S., Schulz, R., Hartung, K., Mokry, M., Piepho, H.-P., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Vortrag-/Tagungsbeitrag
Beitragsort: Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 23; S. 29-30

Nr. 2. 2011

Titel: Ist eine Aufteilung der Stickstoffdüngung für hohe Erträge und Qualitäten bei Winterweizen notwendig? Praxisversuche in Südwestdeutschland
Autoren: Makary, T., Schulz, R., Hubert, S., Hartung, K., Gruber, S., Donath, S., Döhler, J., Weiß, K., Ehrhart, E., Claupein, W., Piepho, H.-P., Pekrun, C., Müller, T.
Beitragsart: Poster-/Tagungsbeitrag
Beitragsort: Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 23; S. 247

Nr. 3. 2012

Titel: Einfluss unterschiedlicher N-Düngestrategien auf den Stroh- und Kornertrag sowie den Harvest-Index bei einem Winterweizen Kompensationstyp
Autoren: Makary, T., Müller, T., Schulz, R., Pekrun, C.
Beitragsart: Poster-/Tagungsbeitrag
Beitragsort: Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 24; S. 247-248

Nr. 4. 2012

Titel: Ist eine gezielte Bestandesführung bei modernen Winterweizen-Sortentypen noch notwendig?
Autoren: Makary, T., Schulz, R., Pekrun, C., Müller, T.
Beitragsart: Poster-/Tagungsbeitrag
Beitragsort: Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 24; S. 249-250

Nr. 5. 2012

Titel: N-Düngung: Strategiewechsel auch im Süden?
Autoren: Makary, T., Schulz, R., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Beitrag in Fachzeitschrift
Beitragsort: TopAgrar, 12/2012; S. 56-61

Nr. 6. 2013

Titel: Sind frühe Düngungstermine bei kompensationsfähigen Winterweizensorten und Standorten mit einem hohen N-Nachlieferungspotential noch notwendig?
Autoren: Makary, T., Schulz, R., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Poster-/Tagungsbeitrag
Beitragsort: Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 25; S. 311-312

Nr. 7. 2013

Titel: Mit frühjahrsbetonten N-Düngestrategien Erträge und Qualitäten bei Winterweizen trotz Vorsommertrockenheiten sichern
Autoren: Makary, T., Schulz, R., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Poster-/Tagungsbeitrag
Beitragsort: Beiträge zur Bernburger Pflanzenforschung. Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanzenbestände unter den Bedingungen der Klimaerwärmung, Internationale wissenschaftliche Konferenz am 18. und 19. Oktober 2012 in Bernburg-Strenzfeld

Nr. 8. 2014

Titel: Aus drei mach zwei, Bei hohem N-Nachlieferungspotenzial können die ersten beiden N-Gaben zusammengefasst werden.
Autoren: Makary, T., Schulz, R., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Beitrag in Fachzeitschrift
Beitragsort: BW-Agrar 3/2014 S.12-14

Nr. 9. 2014

Titel: Was der Boden an Stickstoff nachliefert, das braucht der Landwirt nicht zu streuen.
Autoren: Makary, T., Schulz, R., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Beitrag in Fachzeitschrift
Beitragsort: Österreichische Bauernzeitung, Februar 2014, S. 4,

Nr. 10. 2014

Titel: Wie viele N-Gaben braucht Winterweizen?
Autoren: Makary, T., Schulz, R., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Beitrag in Fachzeitschrift
Beitragsort: Der Pflanzenarzt, 3/2014 S. 16-18

Nr. 11. 2014

Titel: Stößt eine gabenreduzierte N-Düngung mit KAS zu Winterweizen auf Hohertragsstandorten an ihre Grenzen?
Autoren: Michaelis, A.H., Makary, T., Schulz, R., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Poster-/Tagungsbeitrag auf Basis einer betreuten Bachelorarbeit
Beitragsort: Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 26; S. 198-199, VDLUFA Kongress 2014 in Stuttgart-Hohenheim.

Nr. 12. 2014

Titel: Sparen moderne Sorten Überfahrten zur N-Düngung ein?
Autoren: Makary, T., Schulz R., Müller, T., Pekrun, C.
Beitragsart: Beitrag in Fachzeitschrift
Beitragsort: Der Pflanzenarzt 11/12 2014 S. 11-14

Nr. 13. 2015

Titel: Gülle und Gärreste statt mineralischer N-Düngung
Autoren: Hausmann, J., Makary, T., Schulz, R., Müller, T., Moll, W., Ehrhart, E.
Beitragsart: Beitrag in Fachzeitschrift
Beitragsort: BW Agrar 2/2015 Ratgeber Frühjahrssaat

Nr. 14. 2015

Titel: Realisieren gabenreduzierte N-Düngungsverfahren auf tonhaltigen Böden den gleichen Ertrag wie eine dreigeteilte N-Düngung?
Autoren: Knapp, N., Makary, T., Müller, T.
Beitragsart: Posterbeitrag auf Basis einer betreuten Bachelorarbeit
Beitragsort: VDLUFA Kongress 2017 in Freising

Nr. 15. 2017

Titel: Ertrag, Qualität und N-Nutzung von Winterweizen bei gabenreduzierten N-Düngungsstrategien
Autoren: Schöpfle, D., Makary, T., Mokry, M., Kruse, M., Müller, T.
Beitragsart: Posterbeitrag auf Basis einer betreuten Masterarbeit
Beitragsort: VDLUFA Kongress 2017 in Freising

Nr. 16. 2017

Titel: Langjährige Wirtschaftsdünger-Applikation im Kontext der N-Versorgung und der Notwendigkeit geteilter N-Gaben bei Winterweizen
Autoren: Makary, T., Pekrun, C., Müller, T.
Beitragsart: Vortrag
Beitragsort: VDLUFA Kongress 2017 in Freising

Danksagung

Danken möchte ich...

...meinen direkten Betreuer Prof. Dr. Carola Pekrun und Prof. Dr. Torsten Müller für das harmonische Miteinander, die anhaltende Geduld, sowie das entgegengebrachte Vertrauen, die Wertschätzung und die fachliche Unterstützung.

...meinem weiteren Betreuer Dr. Rudolf Schulz für die sehr gute Unterstützung und Anerkennung.

...allen Mitglieder meiner Familie.

...für die Unterstützung und das Verständnis meiner Frau Monika.

...meinen drei Töchtern Lene, Tilda und Rosa für die vielen Abende und Sonntage, die ich aufgrund dieser Arbeit nur bedingt mitgestalten konnte.

...allen Freunden für die mentale Unterstützung und auch den Freunden, die mich durch ihre englischen Sprachkenntnisse unterstützt haben.

...dem gesamten Team der Fachgruppe 340i für die Hilfe und das entspannte Miteinander insbesondere Hans Bucher für die Mithilfe bei der Ernte meiner Versuche.

...den jederzeit helfenden Händen von Frau Christa Schöllhammer, Ursula Berghammer und Angelika Flad des Sekretariats der Fachgruppe 340i und 340 h.

...dem gesamten Team der Versuchsstation „Ihinger Hof“ insbesondere Martin Zahner und „Tachenhausen“ insbesondere Sabine Hubert für die Durchführung und Unterstützung bei den Feldversuchen und deren Probenanalyse.

...allen Beteiligten aus dem Fachbereich Pflanzenbau der Universität Hohenheim.

...dem gesamten Team des Fachbereichs Biostatistik unter der Leitung von Prof Dr. Hans Peter Piehpo und insbesondere Dr. Karin Hartung.

...meinem dritten Prüfer Prof. Dr. Roland Gerhards.

...Prof Dr. Thilo Streck für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

...dem Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg für die finanzielle Unterstützung sowie allen Beteiligten des Regierungspräsidiums Tübingen und der unteren Landwirtschaftsbehörden.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Thomas Makary

Kirchdorfer Weg 11

88457 Kirchdorf an der Iller (Unteropfingen)

geboren am 05.07.1984

in Lebach

verheiratet

drei Töchter

Schulbildung

07/2000

Hauptschulabschluss an der Hauptschule
Losheim am See

09/2000 – 07/2003

TGGBZ Saarbrücken (Berufsschule)

Mittlere Reife, Abschluss als Landwirt

09/2003 – 07/2004

Fachoberschule Agrarwirtschaft Bad Kreuznach
Fachhochschulreife

Berufsausbildung

09/2000 – 07/2003

Ausbildung zum Landwirt auf drei
unterschiedlichen landwirtschaftlichen
Betrieben mit den Schwerpunkten,
Milchviehhaltung, Ackerbau sowie
landwirtschaftliche Dienstleistungen

Hochschulbildung

09/2004 – 05/2008

Fachhochschule Osnabrück
Studiengang Agrarwissenschaften,
Schwerpunkte: Pflanzenbau, Ökonomie und
umweltschonende Tierproduktion
Abschluss als Dipl.-Ing.-agr. (FH)

10/2009- 12/2010

Universität Hohenheim
Studiengang Pflanzenproduktionssysteme
Abschluss als M.Sc.agr.

01/2011 – heute

Annahme als Doktorand an der Universität
Hohenheim, Nebenberufliche Bearbeitung
einer Dissertation zur Thematik
Rahmenbedingungen für eine vereinfachte
„gabenreduzierte“ N-Düngung zu Winterweizen
(*Triticum aestivum*)

Berufliche Tätigkeit

08/2003 – 08/2007

Agrar – Kontor – Plus GmbH
Tätigkeit als Teilzeitkraft
Schwerpunkte: Kundenbetreuung der Agrar –
Kontor – Plus GmbH, Auslieferung von
Agrarprodukten, Logistikplanung, Beratungen
bezüglich Pflanzenschutz, Führen von
Maschinen des angeschlossenen
Marktfruchtbetriebes, Anbauplanung und

05/2008 – 10/2009	Durchführung aller Pflege und Düngemaßnahmen Tätigkeit im Milchviehberatungsdienst im Hohenlohekreis e.V. als Berater für ca. 50 Milchviehbetriebe mit den Schwerpunkten Fütterung und Futterbau
10/2009 – 10/2014	Freiberuflicher Auditor bei der LACON GmbH in Offenburg, Auditorentätigkeit im Bereich QS, EG-ÖKO-VO, Nachhaltiger Biomasseerzeugung (REDcert), QzBW, HACCP
01/2013 – heute	Bewirtschaftung eines landwirtschaftlichen Betriebes mit ca. 45 ha LN, 90 Milchziegen und 750 Legehennen nach der EG-ÖKO-VO und den Bioland Richtlinien
07/2014 – heute	Tätigkeit im Bereich Forschung und Lehre mit Schwerpunkt Düngung an der Universität Hohenheim am Institut für Kulturpflanzenwissenschaften in der Fachgruppe 340i Düngung und Bodenstoffhaushalt
Fortbildungen	Umfangreiche Weiterbildungen im Rahmen der beruflichen Tätigkeiten (Rinderfütterung, QM, EG-ÖKO-VO, Beratung, HACCP,...)
Hobbys und Interessen	Familie, Fahrrad fahren, Sauna, gut Essen

Unteropfingen, den 03.12.2018

Eidesstattliche Versicherung

gemäß § 8 Absatz 2 der Promotionsordnung der Universität Hohenheim zum Dr.sc.agr.

1. Bei der eingereichten Dissertation zum Thema

**Rahmenbedingungen für eine vereinfachte „gabenreduzierte“ N-Düngung zu
Winterweizen (*Triticum aestivum*)**

**Einfluss des Standorts, des N-Nachlieferungspotentials sowie der Sorten und der
Witterung auf das Erreichen von Ertrags- und Qualitätszielen**

handelt es sich um meine eigenständig erbrachte Leistung.

2. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich keiner
unzulässigen Hilfe Dritter bedient.

Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte
als solche kenntlich gemacht.

3. Ich habe nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung oder -beratung in
Anspruch genommen.

4. Die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und der strafrechtlichen Folgen einer
unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt.

Die Richtigkeit der vorstehenden Erklärung bestätige ich.

Ich versichere an Eides Statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit erklärt und
nichts verschwiegen habe.

Ort, Datum

Unterschrift

Eidesstattliche Versicherung

Belehrung

Die Universität Hohenheim verlangt eine Eidesstattliche Versicherung über die Eigenständigkeit der erbrachten wissenschaftlichen Leistungen, um sich glaubhaft zu versichern, dass die Promovendin bzw. der Promovend die wissenschaftlichen Leistungen eigenständig erbracht hat.

Weil der Gesetzgeber der Eidesstattlichen Versicherung eine besondere Bedeutung beimisst und sie erhebliche Folgen haben kann, hat der Gesetzgeber die Abgabe einer falschen eidesstattlichen Versicherung unter Strafe gestellt. Bei vorsätzlicher (also wissentlicher) Abgabe einer falschen Erklärung droht eine Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder eine Geldstrafe.

Eine fahrlässige Abgabe (also Abgabe, obwohl Sie hätten erkennen müssen, dass die Erklärung nicht den Tatsachen entspricht) kann eine Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder eine Geldstrafe nach sich ziehen.

Die entsprechenden Strafvorschriften sind in § 156 StGB (falsche Versicherung an Eides Statt) und in § 161 StGB (Fahrlässiger Falscheid, fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt) wiedergegeben.

§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid, fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt:

Abs. 1: Wenn eine der in den §§ 154 und 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

Abs. 2: Straflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Absätze 2 und 3 gelten entsprechend.

Ich habe die Belehrung zur Eidesstattlichen Versicherung zur Kenntnis genommen.

Ort und Datum Unterschrift